

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2016

Bc. David Škráček

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Přenosová schopnost vedení zvláště vysokého napětí – laboratorní
úloha**

**Transmission Capacity of Extra High Voltage Power Line -
Laboratory Exercise**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Škráček**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Přenosová schopnost vedení zvlášť vysokého napětí - laboratorní úloha
Transmission Capacity of Extra High Voltage Power Line - Laboratory Exercise

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Teorie vedení zvlášť vysokého napětí
Měření na modelu vedení, návrh zapojení a parametrů
Návrh laboratorní úlohy

Seznam doporučené odborné literatury:

RUSEK, Stanislav. Teoretická elektroenergetika. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999, 60 s. ISBN 80-7078-715-5.

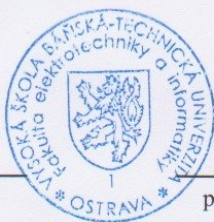
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 27. 4. 2016

Handwritten signature of David Škráček in blue ink, written over a dotted line.

Bc. David Škráček

Poděkování:

Rád bych poděkoval panu Ing. Tadeuszovi Sikorovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vypracování diplomové práce.

Abstrakt:

V diplomové práci je mým cílem přiblížit problematiku přenosové schopnosti vedení zvláště vysokého napětí, zejména pro přenos při stavech naprázdno, nakrátko a pro přirozený výkon.

V úvodu práce se zabývám vedením zvláště vysokého napětí. Poté je zde popsána problematika parametrů vedení, a odvození teoretického výpočtu střídavého vedení zvláště vysokého napětí. Dále se zabývám stožáry dálkového vedení, konkrétně stožárem typu portál.

V praktické části se snažím o výpočet parametru vedení, výpočet náhradního schématu vedení a návrh laboratorního měření. Vedení je řešeno pomocí π článku.

Klíčová slova:

Zvláště vysoké napětí, činný odpor, indukčnost, kapacita, svodová vodivost, π -článek, portálový stožár

Abstract:

The aim of this diploma thesis is to approximate the transmission capacity of extra high voltage line, especially in case of no-load transfer, short-circuit transfer and the transfer with natural load.

The introduction is dedicated to the line of extra high voltage power. Then there is described problematic of line parameters, and derive a theoretical calculation of the alternating line extra high voltage power. Also deal with flagpole remote line, concretely flagpole type portal.

In the practical part is an attempt at calculation of the parameters line, calculation of a spare schema line and design of a laboratory exercise. The line is solved by π - network.

Key words:

Extra high voltage power, active wiring resistance, inductance wiring, capability of wiring, leaky conductance, π - network, flagpole portal

Popis některých použitých symbolů:

Značka	Popis	Jednotka
U_1	Napětí na začátku vedení	(V)
U_2	Napětí na konci vedení	(V)
U_s	Napětí sdružené	(V)
I_1	Proud na začátku vedení	(A)
I_2	Proud na konci vedení	(A)
R	Činný odpor	(Ω)
L	Indukčnost	(H)
G	Svodová vodivost	(S)
C	Kapacita	(F)
Z	Podélná impedance	(Ω)
$\omega = 2\pi f$	Kruhová frekvence	(s^{-1})
Z_V	Vlnová impedance	(Ω)
f	Frekvence	(Hz)
Y	Příčná admitance	(S)
ρ	Měrný odpor vodiče	($\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$)
l	Délka vodiče	(m)
S	Průřez vedení	(mm^2)
R_ϑ	Činný odpor při teplotě ϑ	(Ω)
R_{20}	Činný odpor při teplotě 20°C	(Ω)
$\Delta \vartheta$	Teplotní rozdíl od 20°C	(K)
R_Z	Činný odpor země	($\Omega \cdot km^{-1}$)
r	Poloměr vodiče	(mm)
r_e	Ekvivalentní poloměr vodiče	(mm)
a	Vzdálenost mezi vodiči vodiče	(mm)
U	Potenciál	(V)
Q	Náboj	($C \cdot m^{-1}$)
P	Činný výkon	(W)
\underline{Q}	Jalový výkon	(var)
S	Zdánlivý výkon	(VA)
P_P	Přirozený výkon	(W)
ε	Permitivita	($F \cdot m^{-1}$)
ρ_0	Vzdálenost od vodiče, ve kterém se předpokládá nulový potenciál	(m)
ΔP_s	Svodové ztráty	($W \cdot km^{-1}$)
U_f	Fázové napětí	(V)
G	Svodová vodivost	($S \cdot km^{-1}$)

Obsah

Úvod.....	1
1. Vedení ZVN.....	2
2. Parametry vedení	3
2.1 Činný odpor.....	3
2.2 Indukčnost	4
2.3 Kapacita.....	8
2.4 Svodová vodivost	12
3. Výpočet střídavých vedení zvn	14
3.1 Vedení s rovnoměrně rozloženými parametry.....	14
3.2 Náhrada střídavých vedení zvn soustředěnými parametry	18
3.2.1 Řešení pomocí náhradního π - článku	19
4. Stožáry dálkového vedení	21
4.1 Portálové stožáry	21
5. Vypracování.....	23
5.1 Výpočet parametrů vedení.....	23
5.2 Výpočet náhradního schématu vedení pomocí π - článku	26
5.3 Návrh laboratorního měření	31
5.4 Porovnání výsledků	39
5.5 Návrhy úprav modelu	45
Závěr.....	46
Literatura	47
Seznam příloh	48

Úvod

Diplomová práce se zabývá přenosovou schopností vedení zvláště vysokého napětí. Hladina zvláště vysokého napětí je v rozsahu od 300 kV do 500 kV. Zvláště vysoké napětí se používá k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti. Přenosové vedení zvláště vysokého napětí se vyznačují svými podélnými a příčnými parametry, které jsou distribuovány podél délky vedení.

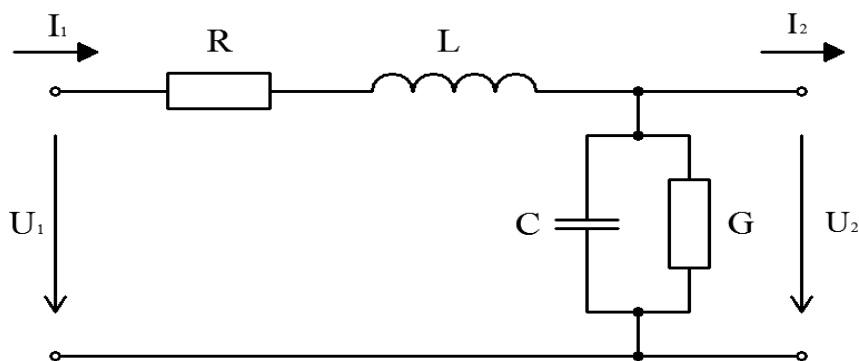
Úvodní kapitola poukazuje na vedení zvláště vysokého napětí, u kterého se respektují čtyři parametry vedení. Druhá kapitola poukazuje na parametry vedení, konkrétně na činný odpor, indukčnost, kapacitu a svodovou vodivost. V následující kapitole se poukazuje na výpočet střídavých vedení zvláště vysokého napětí, konkrétně na vedení s rovnoměrně rozloženými parametry a s vedení se soustředěnými parametry. Čtvrtá kapitola poukazuje na stožáry dálkového vedení, hlavně stožárem typu portál. V páté kapitole se poukazuje na výpočet parametrů vedení, výpočtem náhradního schématu vedení pomocí π - článku, návrhem laboratorního měření a porovnáním výsledků.

Ve své diplomové práci se zabývám výpočtem vedení zvláště vysokého napětí pomocí π - článku. Laboratorním měřením přenosové schopnosti zvláště vysokého napětí pro stavy naprázdno, nakrátko a pro přenos přirozeného výkonu.

1. Vedení ZVN

Vedení zvlášť vysokého napětí je určeno pro přenos velkého množství energie nejčastěji na velké vzdálenosti a to buď uvnitř celostátní elektrizační soustavy, nebo v rámci mezinárodní spolupráce. Vedení zvlášť vysokých napětí je respektováno čtyřmi parametry:

- Činný odpor R
- Indukčnost L
- Kapacita C
- Svodová vodivost G



Obr. 1.1: Schéma parametrů jednofázového vedení zvn

U těchto vedení se zaměříme především na stanovení poměrů na jednom konci přenosu při zadaných poměrech na druhém konci. Tím získáme podklady pro stanovení účinnosti přenosu. [1]

Přenosové vedení se vyznačuje svými podélnými a příčnými parametry, které jsou distribuovány podél délky vedení. Podélné parametry jsou frekvenčně závislé. Podélné parametry na jednotku délky jsou odpor a indukčnost. Zatímco příčné parametry na jednotku délky jsou kapacita a vodivost. Frekvenční závislost podélných parametrů, je vzhledem k zemi a skin-efektu. [2]

Podélná impedance, dle vztahu (1.1):

$$\hat{Z} = R + j\omega L \quad (1.1)$$

Reálnou část tvoří činný odpor, imaginární část tvoří induktivní reaktance.

Příčná admitanci, dle vztahu (1.2).

$$\hat{Y} = G + j\omega C \quad (1.2)$$

Reálnou část tvoří svodová vodivost, imaginární část tvoří kapacitní admitance. [3]

2. Parametry vedení

U venkovního vedení se používají vodiče plného průřezu nebo lana, které mohou být z jednoho materiálu (Cu, Al) nebo ze dvou materiálů (AlFe – železo je použito jako nosná duše, hliník jako vodivý plášť). U vedení 400 kV a vyšších se používají svazkové vodiče. [1]

Parametry vedení jsou řešeny podle Maxwellových diferenciálních rovnic, které vyjadřují vztahy mezi veličinami pole a jsou východiskem pro teoretické řešení všech úloh přenosu elektrické energie. Analýza elektrické obvodu je tedy vlastně zjednodušenou analýzou pole, jejíž dosah je dán právě tím, že zanedbáváme energii vyzařenou z obvodu. Přenos elektrické energie rozvodným systémem se tedy uskutečňuje třemi fyzikálními odlišnými obvody, které jsou vázány Maxwellovými rovnicemi. Obvod proudový tvoří vodiče, obvod magnetický a dielektrický je v prostoru kolem vodiče. [4]

2.1 Činný odpor

Pro stanovení činného odporu musíme respektovat řadu vlivů: materiál vodiče, teplotu, skin efekt (při střídavém proudu), prodloužení délky vodiče vlivem kroucení dílčích vodičů u lan, odchylku skutečného průřezu od jmenovitého, prodloužení vlivem průhybu, nerovnoměrnost průřezu a vliv spojek. Velikost činného odporu při průchodu stejnosměrného proudu, dle vztahu (2.1).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

Měrný odpor ρ je konstantou prostředí, kterou pokládáme za nezávislou na směru proudu, což neplatí u krystalických látek. Měrný odpor závisí na teplotě a to zhruba lineárně u kovových vodičů, dle vztahu (2.2).

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta u) \quad (2.2)$$

Takže lze psát vztah (2.3).

$$R_u = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta u) \quad (2.3)$$

Povrchový efekt – skin a vířivé proudy způsobují, že střídavý proud se nedělí rovnoměrně po celém průřezu, jak je tomu u stejnosměrného proudu, ale jeho hustota je nerovnoměrná – nejmenší v ose vodiče a největší v povrchových vrstvách. Toto nerovnoměrné rozdělení proudu má stejný důsledek, jako zmenšení průřezu a tedy odpor u střídavého proudu je vždy vyšší než u stejnosměrného, dle vztahu (2.4).

$$R_{st} = k \cdot R_{ss} \quad (2.4)$$

Kde činitel k , lze dle Stefana určit dle vztahu (2.5).

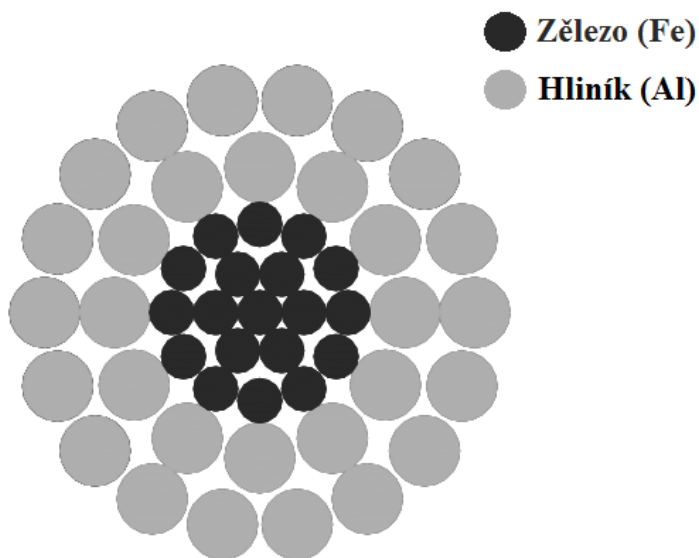
$$k_{al} = 1 + 1,04 \cdot f^2 \cdot S^2 \cdot 10^{-10} \quad (2.5)$$

Ke stanovení skutečného činného odporu vodiče bychom měli respektovat ještě další vlivy. Patří sem prodloužení vodiče vlivem průhybu, vlivem kroucení dílčích vodičů u lan, nerovnoměrnost průřezu a další. Proto se pro přesné určení skutečného odporu vodiče provádí měření.

Ohmický odpor země pro střídavý proud je úměrný frekvenci – čím větší frekvence (při přechodových jevech), tím je užší pásmo ve kterém se zemní proud zhustí vlivem indukčnosti zemní smyčky. Pro odpor země platí vztahu (2.6). [4]

$$R_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad (2.6)$$

Lana kombinovaná, která jsou konstruovány ze dvou materiálů. Jeden materiál slouží jako nosná část s velkou pevností a druhý materiál s velkou vodivostí tvoří elektrovodnou část lana. Užívají se kombinace hliníku s ocelovou duší (AlFe) a slitin hliníku s ocelovou duší (Al_dFe). Označení AlFe X udává zaokrouhlený poměr průřezu hliníku a oceli v laně. Lana s nižším X mají větší pevnost, mají větší průměr a jsou náchylnější na kmitání. [11]



Obr. 2.1: Kombinované lano AlFe

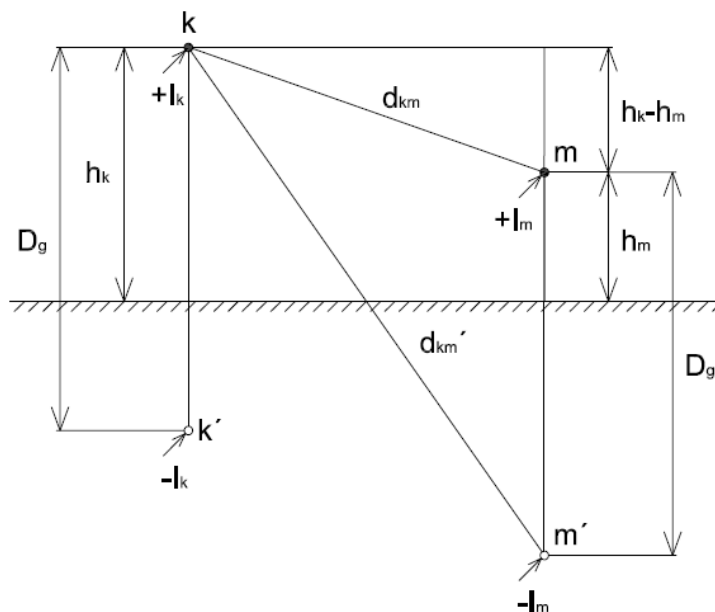
2.2 Indukčnost

Indukčnost představuje zpětný vliv magnetických polí proudu na vedení. Vodič kruhového průřezu, kterým protéká elektrický proud je obklopen magnetickými siločarami. Změna proudu způsobuje změnu magnetického pole, které indukuje ve vlastním vodiči emsu, jejíž velikost je úměrná rychlost této změny a má takový směr, který změně odporuje. Vodič může být ovšem ovlivňován nejen vlastním magnetickým polem, ale i cizím od blízkých vodičů, jimiž protéká také proud. Takže *emsa* indukovaná změnou vlastního proudu vodiče a cizího, je dána vztahem (2.7 a 2.8).

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (2.7); \quad e_M = -M \frac{di}{dt} \quad (2.8)$$

Výslednicí indukčních vlivů, které na sebe vzájemně působí a patří k témuž proudovému obvodu, jmenujeme indukčnost vedení, která se skládá z vlastní a vzájemné indukčnosti. [4]

Při výpočtech indukčnosti nahrazujeme uspořádání smyček n skutečných vodičů a země n skutečnými vodiči s n fiktivním vodičem ve vzájemné vzdálenosti D_g .



Obr. 2.2: Indukčnost

Veličina D_g se nazývá hloubka vodiče v zemi a je určena vztahem (2.9).

$$D_g = \frac{0,178\sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} \quad (2.9)$$

Hloubka vodiče v zemi pro průmyslovou frekvenci bývá asi 600 – 800 m, tj. $h \ll D_g$. Indukčnost vodiče k a fiktivního vodiče k' , tvořícího s ním smyčku je vlastní indukčnost, dle vztahu (2.10).

$$M_{kk} = 0,46 \cdot \log \frac{D_g}{\xi r_k} \quad (2.10)$$

Indukční vazba mezi vodičem k , skutečným vodičem m a jeho odpovídajícím fiktivním vodičem m' je vzájemná indukčnost, dle vztahu (2.11).

$$M_{km} = 0,46 \cdot \log \frac{d_{km'}}{d_{km}} \quad (2.11)$$

Vzhledem k tomu, že v technické praxi platí $d_{km} \ll D_g$; $(h_k - h_m) \ll D_g$. Píšeme podle trojúhelníku vztah (2.12).

$$d_{km'} = \sqrt{[D_g + (h_k - h_m)]^2 + d_{km}^2 - (h_k - h_m)^2} \cong D_g \quad (2.12)$$

A rovnice bude potom (2.13).

$$M_{km} = 0,46 \cdot \log \frac{D_g}{d_{km}} = M_{mk} \quad (2.13)$$

Úbytek napětí ve skutečném vodiči je způsobený vlivem indukčností (vlastní a vzájemné) a je dán ohmovým zákonem (2.14).

$$\Delta \hat{U}_k = \sum_{m=1}^n j\omega M_{km} \hat{I}_m \quad (2.14)$$

Definujeme nyní pojem provozní indukčnost tak, že účinek pravé strany rovnice (2.13) nahradíme stejným účinkem, který by vyvolal provozní indukčnost L_k , k – tého vodiče v uvažovaném n – vodičovém systému, dle vztahu (2.15).

$$\Delta \hat{U}_k = j\omega L_k \hat{I}_k \quad (2.15)$$

Porovnáním rovnice 2.13 a 2.14 získáme výraz pro stanovení provozní indukčnosti k – tého vodiče, dle vztahu (2.16).

$$L_k = \frac{\sum_{m=1}^n M_{km} \hat{I}_m}{\hat{I}_k} \quad (2.16)$$

Rovnice 2.13 pro všechny vodiče píšeme stručně v maticovém zápisu, dle vztahu (2.17).

$$[\Delta \hat{U}_k] = j\omega [M_{km}] \cdot [\hat{I}] \quad (2.17)$$

Indukční reaktance (2.18): [1]

$$X = \omega L = 2\pi f \cdot L \quad (2.18)$$

Svazkové vodiče

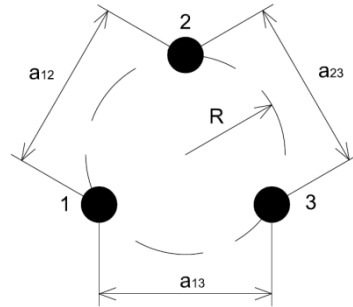
Svazkový vodič se skládá ze dvou, tří až čtyř – elektricky a mechanicky propojených lan, které náleží jedné fázi. V tomto uspořádání se používají v přenosových vedeních vvn a zvn ke snížení indukčnosti a vlivu koróny. Při výpočtu parametru vedení je nutno při tomto druhu vedení dosazovat za poloměr vodiče tzv. ekvivalentní poloměr svazku. Obecný vztah pro ekvivalentní poloměr svazku lze odvodit z potenciálních koeficientů svazku vodiče. Symetrický svazkový vodič, obsahující n vodičů, je ekvivalentní s takovým vodičem, jehož poloměr je dle vztahu (2.19).

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdots a_{1n}} \quad (2.19)$$

Pro ekvivalentní poloměr u trojsvazku platí (2.20): $n = 3$; $a_{12} = a_{13} = a$

$$a_s = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{13}}; R = \frac{1}{\sqrt{3}} a_{12} = \frac{1}{\sqrt{3}} a_s$$

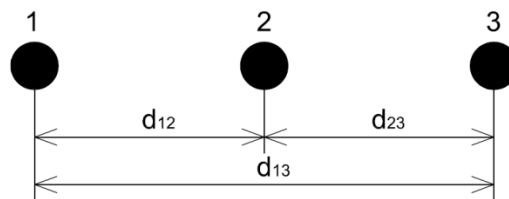
$$r_e = \sqrt[3]{r \cdot a_s^2} \quad (2.20)$$



Obr. 2.3: Trojsvazek

Indukčnost trojfázového vedení

Indukčnost trojfázového vedení, které má vodiče v jedné rovině. Platí že $d_{12} = d_{23} = d$.



Obr. 2.4: Trojfázové vedení v jedné rovině

Střední geometrická vzdálenost vodičů, dle vztahu (2.21).

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad (2.21)$$

Také v tomto případě je samozřejmě indukčnost jednotlivých vodičů rozdílná. Indukčnost je stejná u krajních vodičů a menší u středního. Potom pro střední indukčnost jednoho vodiče trojfázového vedení platí obecný vztah (2.22). [4]

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \quad (2.22)$$

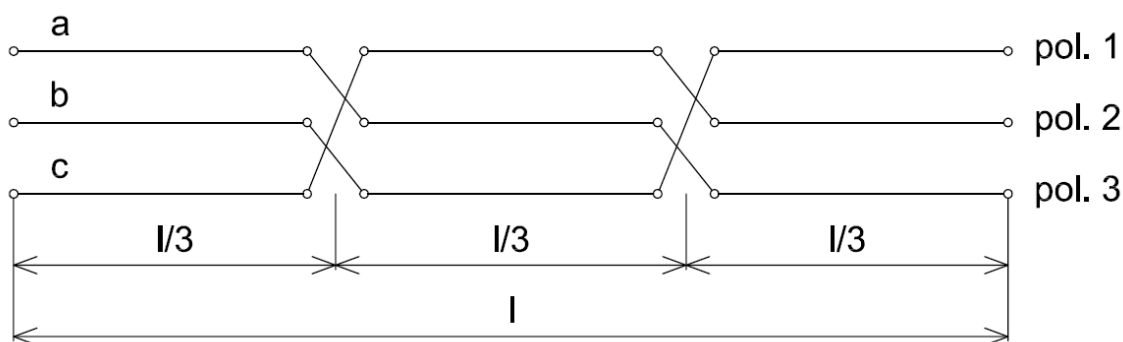
Indukčnost svazkových vodičů trojfázového vedení v jedné rovině. U vedení 400 kV se užívá pro jednu fázi tři paralelních vodičů v symetrickém uspořádání do trojúhelníku se vzdáleností svazku $a_s = 350$ mm.

Střední indukčnost jednoho vodiče trojfázového vedení, které má vodiče v jedné rovině a se svazkovými vodiči, dle vztahu (2.23). [4]

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r_e} + \frac{0,05}{n} \quad (2.23)$$

Transpozice vedení:

Jednoduché vedení s vodiči uspořádanými ve vrcholech rovnostranného trojúhelníku má sice úhrnné indukčnosti všech fází stejné, ale v důsledku nestejných příčných admitancí není úplně symetrické. Vedení s vodiči v obecném uspořádání jednoduché nevykazuje tedy ani v podélných ani v příčných složkách přirozenou symetrii. Vyrovnání rozdílu v podélných a příčných parametrech elektrických vedení se dosahuje symetrizací. Symetrizaci dosahujeme pomocí prostřídání fázových vodičů tzv. transpozicí. Úplná transpozice, celý transpoziční cyklus obsahuje úplné prostřídání všech fázových vodičů tak, že jsou všechny polohy vodičů vzájemně vystřídány. Podle toho je dílčí transpozice provedena v první třetině a v druhé třetině sledovaného úseku. Schéma jednoho cyklu úplné transpozice je na obr. 2. 5. [6]



Obr. 2.5: Schéma transpozice

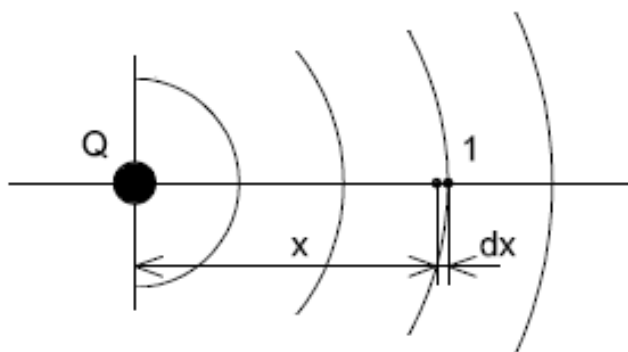
2.3 Kapacita

Dvě elektrody, které mají různé napětí a jsou oddělené dielektrikem, tvoří tzv. kondenzátor. U elektrického vedení jsou elektrodami jednak vodiče mezi sebou a jednak vodiče a zem.

Výpočty kapacit se dělí do dvou skupin:

- Určení kapacity některého vodiče vyšetřované soustavy, která je dána vlivem ostatních vodičů a země. Tento údaj lze získat ze základních vztahů pro elektrické pole a slouží hlavně pro výpočet nabíjecího proudu neporušeného vedení.
- Určení částečných kapacit, tj. mezi vodiči nebo vodičem a zemí. Tyto údaje určujeme pomocí Maxwellovy soustavy kapacitních rovnic a slouží hlavně při rozboru potenciálních poměrů a kapacit porušeného vedení.

Pro základní úvahu zvolme nekonečnou přímku, která na jednotku délky má náboj Q .



Obr. 2.6: Kapacita

Pole způsobené rovnoměrně rozloženým nábojem na přímce (2.24).

$$H = \frac{2Q}{\epsilon} \cdot \frac{1}{x} \quad (2.24)$$

Mezi intenzitou elektrického pole a potenciálem platí vztah (2.25).

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2Q}{\epsilon} \cdot \frac{1}{x} = H \quad (2.25)$$

Takže pro potenciál platí vztah (2.26).

$$dU = -H \cdot dx = -\frac{2Q}{\epsilon} \cdot \frac{1}{x} \cdot dx \quad (2.26)$$

Potenciál ve vzdálenosti x od náboje Q v soustavě cgses (2.27).

$$U = -\frac{2Q}{\epsilon} \cdot \int \frac{1}{x} \cdot dx = -\frac{2Q}{\epsilon} \cdot \ln x = \frac{2Q}{\epsilon} \cdot \ln \frac{1}{x} \quad (2.27)$$

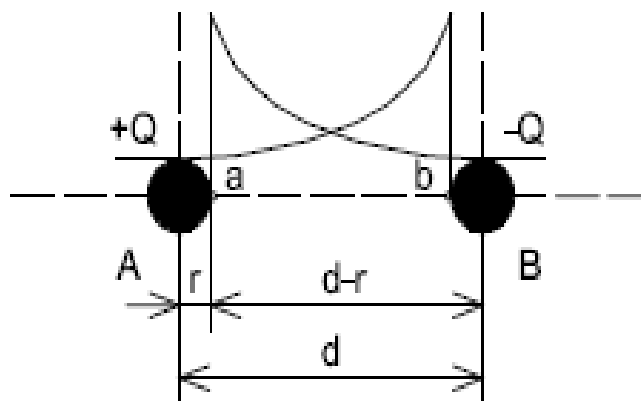
Převedením do soustavy MKSA víme, že $\epsilon = 1$; $1 \text{ Farad} / \text{km} = \frac{9 \cdot 10^{11}}{10^5} = 9 \cdot 10^6 \text{ cgses}$.

Přejde rovnice 2.27 na vztah (2.28).

$$U = 9 \cdot 10^6 \cdot 2Q \cdot \ln \frac{1}{x} \quad (2.28)$$

Tato rovnice platí pro libovolný počet paralelních vodičů za předpokladu, že jejich vzájemná vzdálenost vzhledem k poloměru vodičů je dostatečně velká, takže si vzájemně neovlivňují vytvoření intenzity pole.

Aplikujeme rovnici 2.27 na dva paralelní vodiče:



Obr. 2.7: Dva paralelní vodiče

Potenciál vodiče A v bodě a od náboje $+Q$ platí vztah (2.29).

$$U_{A+} = 9 \cdot 10^6 \cdot 2Q \cdot \ln \frac{1}{r} \quad (2.29)$$

Potenciál vodiče A v bodě a od náboje $-Q$ platí vztah (2.30).

$$U_{A-} = -9 \cdot 10^6 \cdot 2Q \cdot \ln \frac{1}{d-r} \quad (2.30)$$

Takže pro potenciál vodiče A platí vztah (2.31).

$$U_A = U_{A+} + U_{A-} = 9 \cdot 10^6 \cdot 2Q \cdot \ln \frac{d-r}{r} \quad (2.31)$$

Pro potenciál vodiče B platí vztah (2.32).

$$U_B = U_{B+} + U_{B-} = 9 \cdot 10^6 \cdot 2Q \cdot \ln \frac{r}{d-r} \quad (2.32)$$

Potenciální rozdíl mezi vodiči, dle vztahu (2.33).

$$U = U_A + U_B = 9 \cdot 10^6 \cdot 2Q \cdot \left[\ln \frac{d-r}{r} - \ln \frac{r}{d-r} \right] = 36 \cdot 10^6 \cdot 2Q \cdot \ln \frac{d-r}{r} \quad (2.33)$$

Zanedbáme-li v rovnici 2.33 r , které je vůči d malé, a převedeme ($10^{-6} \text{ F} = 1 \text{ } \mu\text{F}$) potom provozní kapacita volného vedení, které sestává ze dvou vodičů (2.34).

$$C_{A+B} = \frac{Q}{U} = \frac{1}{36 \cdot \ln \frac{d}{r}} \quad (2.34)$$

Kapacitu “ C_{A+B} ” je možné považovat za výslednici dvou stejných kapacit spojených do série (2.35).

$$C_A = C_B = C; C_{AB} = \frac{C_A \cdot C_B}{C_A + C_B} = \frac{C}{2} \quad (2.35)$$

Pro kapacitu jednoho vodiče platí vztah (2.36).

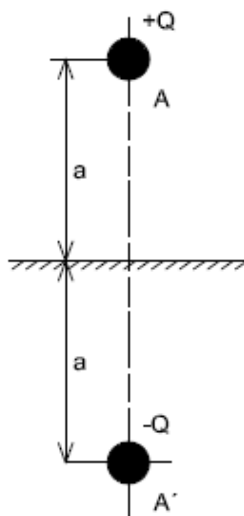
$$C = 2 \cdot C_{A+B} = \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{d}{r}} \quad (2.36)$$

Pro kapacitní vodivost platí vztah (2.37).

$$B = \omega \cdot C = 2\pi f \cdot C \quad (2.37)$$

Obdobnou úvahu lze provést pro elektrické pole vodiče nad zemí, který by vytvářel totožné pole, jako jeho zrcadlový obraz pod zemí. Země je ekvipotencionální plocha s nulovým potenciálem. A je zřejmé, že rovnici 2.36 lze přepsat pro tento případ na vztah (2.38). [4]

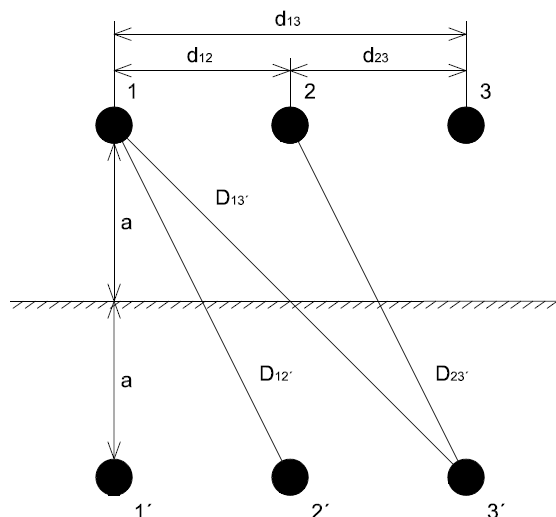
$$C_0 = \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{2a}{r}} \quad (2.38)$$



Obr. 2.8: Kapacita vodiče nad zemí

Kapacita trojfázového vedení

Kapacita trojfázového vedení, které má vodiče v jedné rovině s uvažováním vlivu země.



Obr. 2.9: Kapacita trojfázového vedení s uvažováním vlivu země

Platí, že vzdálenosti vodičů od země jsou stejné, tedy $a = b = c$. Střední vzdálenost mezi vodiči a zemí, dle vztahu (2.39).

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad (2.39)$$

Střední vzdálenost mezi vodiči a zrcadlicími vodiči, dle vztahu (2.40).

$$D_S = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{13'}} \quad (2.40)$$

Pro kapacitu trojfázového vedení, které má vodiče v jedné rovině, platí vztah (2.41). [4]

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r_e} \cdot \frac{2 \cdot m}{D_S}} \quad (2.41)$$

2.4 Svodová vodivost

Izolace elektrických zařízení musí být přiměřeně daným pracovním podmínkám a musí být zabezpečena konstrukcí a izolační jakostí jednotlivých částí.

V technické praxi neexistují absolutní elektrické izolanty, a proto při provozu vedení prochází za jistých podmínek (znečištění izolátorů, vlhko, déšť) svodový proud z vodiče přes izolátory a sloupy do země. Tento proud je ve fázi s napětím jej vyvolávajícím tj. mezi vodiči U_S a proti zemi U_f – eventuálně s příslušným rozdílem potenciálů. Svodový proud koróny je rovněž ve fázi s napětím provozním.

Tab. č. 2.1: Informativní hodnoty svodové vodivosti

U (kV)	G (S/km)
220	$(2,5 \div 3,6) \cdot 10^{-8}$
400	$(1,4 \div 2) \cdot 10^{-8}$

Měření těchto svodových proudů je velmi obtížné, protože svodová ztráta se objevuje se ztrátou dielektrickou pohromadě, takže ke svodovému proudu se přidává i kapacitní nabíjecí proud vedení s 90° fázovým posunem.

Svod se obvykle určuje výpočtem z neměřených nebo vypočtených trojfázových činných ztrát P_s korónou, dle vztahu (2.33). [1]

$$G_1 = \frac{P_s}{U^2} \quad (2.33)$$

U venkovního vedení je svod způsoben hlavně povrchovým svodovým proudem, který je největší za deště nebo za vlhka, zvlášť je-li povrch izolátorů pokryt vodivou vrstvou nečistot (uhelný prášek, chemické výpary). V takovém případě je třeba izolátory často kontrolovat a čistit. Ztráty svodem se vždy vyjadřují spolu se ztrátami korónou, protože oba druhy ztrát jsou funkcí napětí. [7]

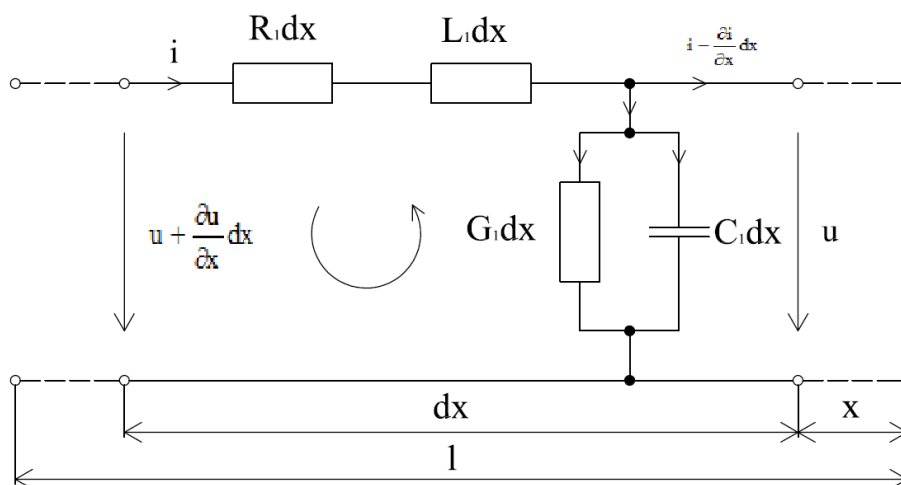
3. Výpočet střídavých vedení zvn

Když řešíme vedení zvlášť vysokého napětí, tak určujeme poměry na jednom konci vedení při zadaném poměru na druhém konci. Pro přesné řešení je nutno respektovat podélnou impedanci i příčnou admitanci. U vedení uvažujeme parametry rovnoměrně rozložené. Uvažujeme všech čtyř parametrů (R , L , C , G).

3.1 Vedení s rovnoměrně rozloženými parametry

Uvedené parametry vedení jsou rovnoměrně rozložené podél celé jeho délky. Takové vedení nazýváme homogenním vedením.

Element homogenního vedení délky dx , vzdálený od konce vedení o hodnotu x je na obr. 3. 1.



Obr. 3.1: Schéma vedení s rozloženými parametry

Parametry R_1 , L_1 , C_1 a G_1 jsou udány na jeden kilometr délky. Podle 2. Kirchhoffova zákona platí pro element na obrázku vztah (3.1).

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u - R_1 \cdot i dx - L_1 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} dx = 0 \quad (3.1)$$

Odkud vyplývá vztah pro změnu napětí na úseku dx (3.2).

$$\frac{\partial u}{\partial x} = R_1 \cdot i + L_1 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.2)$$

Podle 1. Kirchhoffova zákona pro součet proudů v uzlu elementu dx platí vztah (3.3).

$$i - \frac{\partial i}{\partial x} dx - i + G_1 \cdot u dx + C_1 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dx = 0 \quad (3.3)$$

A odkud změna proudu v elementu, dle vztahu (3.4).

$$\frac{\partial \hat{i}}{\partial x} = G_1 \cdot u + C_1 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.4)$$

Do rovnic 3.2, 3.4 dosadíme střídavé napětí a proud, pak platí vztah (3.5, 3.6).

$$u = \text{Re}\{\sqrt{2} \cdot \hat{U}_f \cdot e^{j\omega t}\} \quad (3.5), \quad i = \text{Re}\{\sqrt{2} \cdot \hat{I}_f \cdot e^{j\omega t}\} \quad (3.6)$$

Jejichž požadované derivace jsou vztahy (3.7, 3.8, 3.9, 3.10)

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \sqrt{2} \cdot \text{Re}\left\{\frac{d\hat{U}_f}{dx} \cdot e^{j\omega t}\right\} \quad (3.7), \quad \frac{\partial i}{\partial x} = \sqrt{2} \cdot \text{Re}\left\{\frac{d\hat{I}_f}{dx} \cdot e^{j\omega t}\right\} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sqrt{2} \cdot \text{Re}\{j\omega \hat{U}_f \cdot e^{j\omega t}\} \quad (3.9), \quad \frac{\partial i}{\partial t} = \sqrt{2} \cdot \text{Re}\{j\omega \hat{I}_f \cdot e^{j\omega t}\} \quad (3.10)$$

Po dosazení, zjednodušení a zkrácení bude vztah (3.11, 3.12).

$$\frac{d\hat{U}_f}{dx} = (R_1 + j\omega L_1) \cdot \hat{I} = \hat{Z}_{ll} \cdot \hat{I} \quad (3.11)$$

$$\frac{d\hat{I}}{dx} = (G_1 + j\omega C_1) \cdot \hat{U}_f = \hat{Y}_{ql} \cdot \hat{U}_f \quad (3.12)$$

Derivací vztahu 3.11 a použitím vztahu 3.12, dostaneme vztah (2.13).

$$\frac{\partial^2 \hat{U}_f}{\partial x^2} = \hat{Z}_{ll} \cdot \frac{d\hat{I}}{dx} = \hat{Z}_{ll} \hat{Y}_{ql} \hat{U}_f = \hat{\gamma}^2 \hat{U}_f \quad (3.13)$$

Podobně pro vztah (2.14).

$$\frac{\partial^2 \hat{I}}{\partial x^2} = \hat{Y}_{ql} \cdot \frac{d\hat{U}_f}{dx} = \hat{Z}_{ll} \hat{Y}_{ql} \hat{I} = \hat{\gamma}^2 \hat{I} \quad (3.14)$$

V obou posledních rovnicích jsme zavedli komplexní konstantu přenosu (3.15)

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\hat{Z}_{ll} \hat{Y}_{ql}} \quad (3.15)$$

Rovnice 3.13 a 3.14 jsou lineární diferenciální rovnice druhého řádu. Obecný integrál je vztah (3.16). Kde K_1 a K_2 jsou komplexní integrační konstanty.

$$\hat{U}_f = \hat{K}_1 \cdot e^{\hat{\gamma}x} + \hat{K}_2 \cdot e^{-\hat{\gamma}x} \quad (3.16)$$

Podle 3.11 s použitím 3.16, pro proud platí vztah (3.17).

$$\hat{I} = \sqrt{\frac{\hat{Y}_{q1}}{\hat{Z}_{l1}}} \cdot (K_1 \cdot e^{\hat{\gamma} \cdot x} - K_2 \cdot e^{-\hat{\gamma} \cdot x}) = \frac{1}{\hat{Z}_v} \cdot (K_1 \cdot e^{\hat{\gamma} \cdot x} - K_2 \cdot e^{-\hat{\gamma} \cdot x}) \quad (3.17)$$

Kde jsme zavedli pojem vlnová impedance (3.18).

$$\hat{Z}_v = \sqrt{\frac{\hat{Y}_{q1}}{\hat{Z}_{l1}}} \quad (3.18)$$

Integrační konstanty K_1 a K_2 se určí z okrajových podmínek. Pro konec vedení $x = 0$ označíme $\hat{U}_f = \hat{U}_{f2}$ a $\hat{I} = \hat{I}_2$, a pro začátek vedení $x = 1$ označíme $\hat{U}_f = \hat{U}_{f1}$ a $\hat{I} = \hat{I}_1$.

Potom podle 3.16 a 3.17 bude vztah (3.19, 3.20).

$$\hat{U}_{f2} = \hat{K}_1 + \hat{K}_2 \quad (3.19)$$

$$\hat{I}_2 = \frac{1}{\hat{Z}_v} (\hat{K}_1 - \hat{K}_2) \quad (3.20)$$

Z posledních dvou rovnic vyjádříme integrační konstanty K_1 (3.21) a K_2 (3.22)

$$\hat{K}_1 = \frac{1}{2} \cdot (\hat{U}_{f2} + \hat{Z}_v \hat{I}_2) \quad (3.21); \quad \hat{K}_2 = \frac{1}{2} \cdot (\hat{U}_{f2} - \hat{Z}_v \hat{I}_2) \quad (3.22)$$

a zpětné dosazení do 3.16 a 3.17 poskytuje pro napětí (3.23) a proud (3.24) na začátku vedení.

$$\hat{U}_{f1} = \hat{U}_{f2} \cdot \frac{e^{\hat{\gamma} \cdot l} + e^{-\hat{\gamma} \cdot l}}{2} + \hat{Z}_v \hat{I}_2 \cdot \frac{e^{\hat{\gamma} \cdot l} - e^{-\hat{\gamma} \cdot l}}{2} \quad (3.23)$$

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}_{f2}}{\hat{Z}_v} \cdot \frac{e^{\hat{\gamma} \cdot l} - e^{-\hat{\gamma} \cdot l}}{2} + \hat{I}_2 \cdot \frac{e^{\hat{\gamma} \cdot l} + e^{-\hat{\gamma} \cdot l}}{2} \quad (3.24)$$

Použitím hyperbolických funkcí získáme důležité rovnice pro řešení napěťových (3.25) a proudových (3.26) poměrů homogenního vedení.

$$\hat{U}_{f1} = \hat{U}_{f2} \cdot \cosh \hat{\gamma} l + \hat{Z}_v \hat{I}_2 \cdot \sinh \hat{\gamma} l \quad (3.25)$$

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}_{f2}}{\hat{Z}_v} \cdot \sinh \hat{\gamma} l + \hat{I}_2 \cdot \cosh \hat{\gamma} l \quad (3.26)$$

Rovnice 3.25 a 3.26 se často píšou ve tvaru (3.27, 3.28). Kde A, B, C a D jsou tzv. Blondelovy konstanty homogenního vedení, pro něž platí vztahy (3.29, 3.30). [4]

$$\hat{U}_{f1} = \hat{A} \cdot \hat{U}_{f2} + \hat{B} \cdot \hat{I}_2 \quad (3.27)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{C} \cdot \hat{U}_{f2} + \hat{D} \cdot \hat{I}_2 \quad (3.28)$$

$$\hat{A} = \hat{D} \quad (3.29); \quad \hat{A} \cdot \hat{D} - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (3.30)$$

Můžeme stanovit Blondelovy konstanty, dle vztahů (3.31, 3.32, 3.33, 3.34). [5]

$$\hat{A} = \cosh(\hat{\gamma} l) = \cosh(l \sqrt{\hat{Z}_{ll} \hat{Y}_{q1}}) \quad (3.31)$$

$$\hat{B} = \hat{Z}_v \sinh(\hat{\gamma} l) = \sqrt{\frac{\hat{Z}_{ll}}{\hat{Y}_{q1}}} \sinh(l \sqrt{\hat{Z}_{ll} \hat{Y}_{q1}}) \quad (3.32)$$

$$\hat{C} = \frac{1}{\hat{Z}_v} \sinh(\hat{\gamma} l) = \sqrt{\frac{\hat{Y}_{q1}}{\hat{Z}_{ll}}} \sinh(l \sqrt{\hat{Z}_{ll} \hat{Y}_{q1}}) \quad (3.33)$$

$$\hat{D} = \hat{A} \quad (3.34)$$

Další potřebné hodnoty na začátku vedení stanovíme z trojfázového komplexního výkonu (3.35).

$$\hat{S}_1 = 3 \cdot \hat{U}_{f1}^* \cdot \hat{I}_1 \quad (3.35)$$

Ztráty činného výkonu (3.36).

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (3.36)$$

Účinnost přenosu (3.37).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (3.37)$$

Pro porovnání přenosové schopnosti u vedení vvn a zvn se používá přirozený výkon. [4]

Činitel šíření

Je to komplexní veličina. Reálná část α se nazývá konstantou útlumu. Konstanta útlumu určuje míru změny amplitudy proudu nebo napětí na jednotku délky vedení. Imaginární část β se nazývá fázovou konstantou. Fázová konstanta určuje úhlové natočení proudu nebo napětí na jednotku délky vedení. Definuje ji vztah (3.38).

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\hat{Z}_{ll} \hat{Y}_{q1}} \quad (3.38)$$

Vlnová impedance

Je to komplexní veličina. Vlnová impedance charakterizuje přenosovou schopnost vedení. Velikost vlnové impedance se u venkovního vedení pohybuje od 200 do 500 Ω . Definuje ji vztah (3.39).

$$\hat{Z}_v = \sqrt{\frac{\hat{Y}_{q1}}{\hat{Z}_{11}}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3.39)$$

Přirozený výkon

Je to komplexní veličina. Když bude vedení na konci zatíženo impedancí rovnou vlnové impedanci, pak bude vedení přenášet přirozený výkon a z hlediska přenosu se jedná o optimální stav. Na vedení vznikají minimální ztráty, které jsou způsobené odporem vedení a v případě bezztrátového přenosu by napětí na začátku a na konci vedení byla stejná. Když je přenášený výkon menší než přirozený, je napětí na konci vyšší než na začátku vedení a naopak. Definuje ji vztah (3.40).

$$\hat{S}_p = \frac{U_2^2}{\hat{Z}_v} \quad (3.40)$$

3.2 Náhrada střídavých vedení zvn soustředěnými parametry

Při výpočtu a při kreslení náhradních schémat sítí se používají náhradní články. Jedná se o pasivní čtyřpóly, kde proud a napětí na začátku (I_1 , U_{1f}) a na konci (I_2 , U_{2f}) jsou navzájem vázány vztahy (3.41, 3.42).

$$\hat{U}_{1f} = \hat{A} \hat{U}_{2f} + \hat{B} \hat{I}_2 \quad (3.41)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{C} \hat{U}_{2f} + \hat{D} \hat{I}_2 \quad (3.42)$$

Pro Blondelovy konstanty platí vztah (3.43).

$$\hat{A} \cdot \hat{D} - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (3.43)$$

Když je čtyřpól symetrický, lze zaměnit výstupní a vstupní svorky, aniž by došlo ke změně přenosových poměrů, platí vztah (3.44).

$$\hat{A} = \hat{D} \quad (3.44)$$

A rovnici 3.23 lze zjednodušit na tvar (3.45).

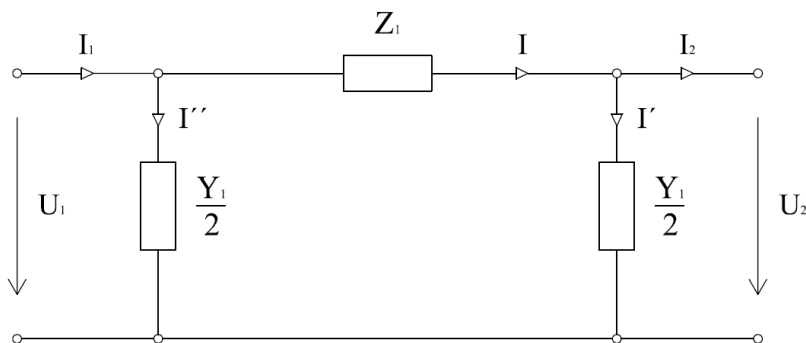
$$\hat{A}^2 - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (3.45)$$

Vedení vvn a zvn nahrazujeme několika typy pasivních náhradních článků, které nazýváme podle vnitřního uspořádání (t-článek, π -článek). Všechny náhradní články jsou symetrické. [3]

Pro porovnání přenosové schopnosti u vedení vvn a zvn se používá přirozený výkon. [4]

3.2.1 Řešení pomocí náhradního π - článku

V tomto případě (Obr. 3.2) náhradní článek π je vytvořený tak, že podélná impedance celého vedení se soustředí do středu vedení a příčná admittance celého vedení, rozdělená na dvě poloviny a ty se umístí na začátek a konec vedení.



Obr. 3.2: Náhradní schéma π článku

Sledujme opět schéma a fázorový diagram (Obr. 3. 3) tohoto náhradního článku, přičemž vycházíme ze známých parametrů vedení a ze známých fázorů napětí (3.46) a proudu (3.47) na konci vedení.

$$\hat{U}_1 = \hat{U}_2 + \hat{Z}_1 \cdot 1 \cdot \hat{I} = \hat{U}_2 + \hat{Z}_1 \cdot 1 \cdot (\hat{I}_2 + \hat{I}') \quad (3.46)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 + \hat{I}' + \hat{I}'' \quad (3.47)$$

Kapacitní posuvný proud I' (3.48) na konci vedení se vypočítá z napětí na konci, kapacitní proud I'' (3.49) se vypočítá z napětí na začátku vedení.

$$\hat{I}' = \hat{U}_2 \cdot \frac{\hat{Y}_1 \cdot 1}{2} \quad (3.48), \quad \hat{I}'' = \hat{U}_1 \cdot \frac{\hat{Y}_1 \cdot 1}{2} \quad (3.49)$$

Dosazením proudu I' do rovnice 3.46 dostaneme napětí na začátku vedení, dle vztahu (3.50).

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 &= \hat{U}_2 + \hat{Z}_1 \cdot 1 \cdot \left(\hat{I}_2 + \hat{U}_2 \cdot \frac{\hat{Y}_1 \cdot 1}{2} \right) = \hat{U}_2 + \hat{Z}_1 \cdot 1 \cdot \hat{I}_2 + \hat{U}_2 \cdot \frac{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Y}_1 \cdot 1^2}{2} \\ &= \hat{U}_2 \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Y}_1 \cdot 1^2}{2} \right) + \hat{Z}_1 \cdot 1 \cdot \hat{I}_2 = A \cdot \hat{U}_2 + B \cdot \hat{I}_2 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Při výpočtu proudu na začátku vedení při známých hodnotách na jeho konci použijeme výrazy posuvných kapacitních proudů I' a I'' , přičemž do vztahu pro posuvný proud na začátku vedení U_1 dosadíme výraz z rovnice 3.50. Potom bude vztahu (3.51).

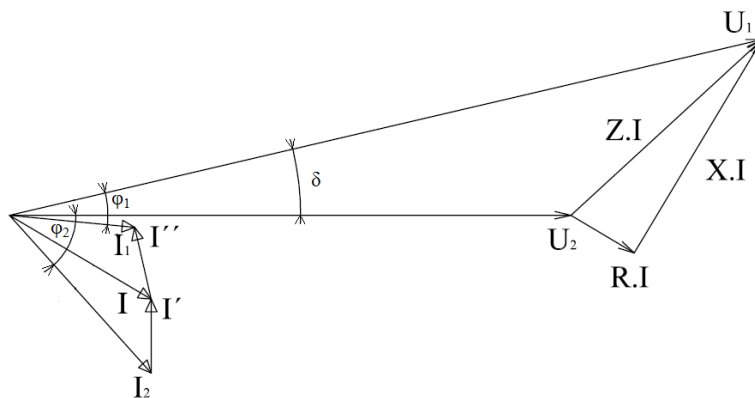
$$\hat{I}_1 = \hat{U}_2 \cdot \hat{Y}_1 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Y}_1 \cdot 1^2}{4} \right) + \hat{I}_2 \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Y}_1 \cdot 1^2}{2} \right) = C \cdot \hat{U}_2 + D \cdot \hat{I}_2 \quad (3.51)$$

Blondelovy konstanty pro náhradní π článek, dle vztahů (3.52, 3.53, 3.54).

$$\hat{A}_\pi = \hat{D}_\pi = 1 + \frac{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Y}_1 \cdot l^2}{2} \quad (3.52)$$

$$\hat{B}_\pi = \hat{Z}_1 \cdot l \quad (3.53)$$

$$\hat{C}_\pi = \hat{Y}_1 \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_1 \cdot \hat{Y}_1 \cdot l^2}{4}\right) \quad (3.54)$$



Obr. 3.3: Fázorový diagram π článku

Výpočet vedený náhradním článkem π má dostatečnou přesnost pro vzdálenosti vedení do 500 km. [8]

4. Stožáry dálkového vedení

Široké uplatnění mají stožáry v oblasti rozvodu elektrické energie. Rozlišujeme tři skupiny stožárů a to jsou stožáry dálkového vedení pro různě vysoké napětí, stožáry pro elektrifikovanou železnici a stožáry pro městskou hromadnou dopravu tramvajovou a trolejbusovou. V této práci se zaměřím na stožáry dálkového vedení.

Elektrická vedení jsou technologická zařízení přenášející požadované elektrické výkony buď od primárních zdrojů, nebo od sekundárních zdrojů na určitá místa. Venkovní elektrická vedení mají elektrické výkony přenášet hospodárně, spolehlivě, bezpečně a s nejmenšími zásahy do životního prostředí.

Důležitou částí celého rozvodného systému jsou stožáry. Funkcí stožáru je udržovat vodiče v potřebných vzdálenostech mezi sebou, od vlastní konstrukce, od země a jiných objektů. Stožáry musí přenášet veškeré zatížení působící na vodiče a na stožár a jeho příslušenství. Stožáry dálkového vedení se rozlišují především podle výšky napětí elektrického vedení. Postupná koncentrace výroby elektrické energie do velkých elektráren vyžaduje přenášet stále větší energie do větších vzdáleností. Proto vedle distribučního systému nízkého do 1 kV a vysokého napětí do 35 kV se postupně přecházelo k velmi vysokému napětí, a to 110 kV v roce 1923 až po zvlášť vysoké napětí 400 kV v roce 1959.

Tvar a konstrukční řešení stožárů je ovlivňováno funkčními požadavky, stavební technikou, podmínkami staveniště, výroby, montáže a údržbou.

Podle funkce a polohy stožáru v trase rozeznáváme:

N – nosné stožáry. Jsou to mezilehlé stožáry přímé trasy, na kterých jsou vodiče zavěšeny pomocí svislých izolátorových závěsů. Vodorovné složky tahů vodiče se na izolátorech ruší, takže stožár ve směru vedení je namáhán vodorovnou silou jen od tlaku větru na stožár. Převládajícím zatížením je zatížení kolmo na směr vedení.

V – výztužné stožáry. Vytvářejí pevné body na trase. Vodiče jsou ke stožáru připojeny pomocí kotevních izolátorových závěsů, namáhaných plným tahem vodiče. Vodič přechází přes izolátory přeponkou bez mechanického namáhání. Výztužné stožáry jsou důležité i pro napínání vodičů, proto je jejich počet a poloha závislá na postupu montáže. Při dimenzování se zpravidla uvažuje jednostranné zatížení, které odpovídá 2/3 maximálního tahu vodiče a zemního lana.

R – rohové stožáry. Jsou v lomech trasy, mohou být jako nosné nebo výztužné. Rohové stožáry přenášejí výslednici tahů ve vodičích včetně námrazy.

4.1 Portálové stožáry

Nejčastěji používaným typem portálových stožárů je dlouhý příčník podepíraný dvěma svislými dřívky čtyřboké konstrukce s příčným řezem buď konstantním, plynule proměnným, nebo nad základem rozšířeným. Tvarování příčníku už bývá rozmanitější, a to jak v podélném směru, tak v příčném řezu. Při konstruování dřívku převládají úhelníkové konstrukce. Při montáži se používá buď klopení okolo dočasných, nebo trvalých kloubů nebo zdvižení pojízdnými jeřáby.

Portálové konstrukce se používají především pro nosné stožáry, výztužné stožáry mohou nižší (odpadá přídavek na výšku izolátorových řetězců), a proto mohou být i jinak řešeny, to platí i pro rohové stožáry. [9]



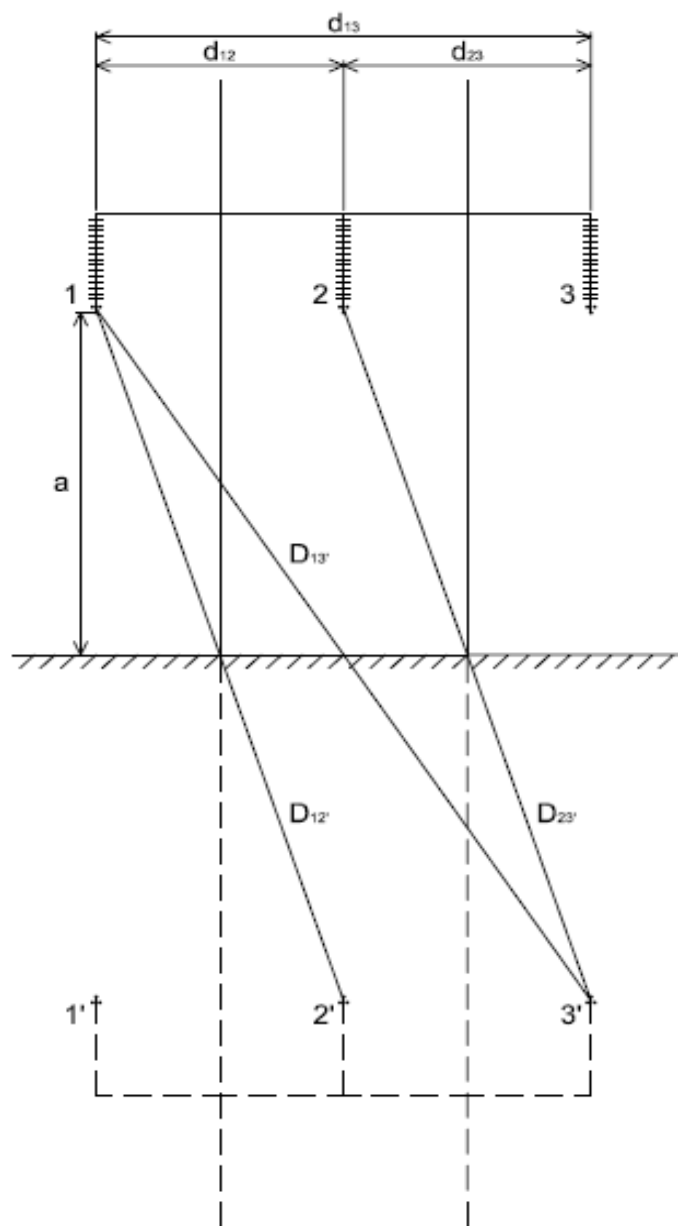
Obr. 4.1: Stožár portál [10]

V SSSR používají pro vedení 400 kV portálový typ z jednoduchých úhelníků. Nosné portály mají dřívky v základech vetknuty, spojení s příčlí bývá kloubové nebo tuhé. U rohových výztužných stožárů je možno dosáhnout větší tuhosti v rovině portálu vložením šikmých dřívků a v podélném směru rozkročením dřívku. [9]

5. Vypracování

5.1 Výpočet parametrů vedení

Zadané hodnoty vycházejí z vlastností vodiče a z rozměrů stožáru: vodič AlFe4 350 mm²; vzdálenost $l = 1000$ m; měrný odpor vodiče $\rho_{Al} = \frac{1}{33} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$; průměr vodiče $d = 26,8$ mm; vodiče jedné fáze jsou v symetrickém trojsvazku o vzdálenosti vodičů $a = 350$ mm; vzdálenost mezi vodiči $a_{12} = 12$ m, $a_{23} = 12$ m, $a_{13} = 24$ m a $b_{12} = b_{23} = b_{13} = 0$ m; počet vodičů v trojsvazku $n = 3$; frekvence $f = 50$ Hz; vzdálenost vodičů od země $a = b = c = 17,98$ m; vzdálenost mezi vodiči a zrcadlenými vodiči $A_{12'} = 12$ m, $A_{23'} = 12$ m, $A_{13'} = 24$ m a $B_{12'} = B_{23'} = B_{13'} = 35,96$ m.



Obr. 5.1: Stožár portál

Odpor jednoho vodiče (5.1):

$$R_k = \rho \cdot \frac{1}{S} = \frac{1000}{33 \cdot 350} = \underline{\underline{0,087 \Omega \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.1)$$

Odpor jednoho vodiče u trojsvazku (5.2):

$$R_{k3} = \frac{R}{3} = \frac{0,087}{3} = \underline{\underline{0,029 \Omega \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.2)$$

Ekvivalentní poloměr (5.3):

$$r_e = \sqrt[3]{r \cdot a^2} = \sqrt[3]{\frac{26,8}{2} \cdot 350^2} = 117,963 \text{ mm} \cong \underline{\underline{0,118 \text{ m}}} \quad (5.3)$$

Vzdálenost vodičů (5.4, 5.5, 5.6):

$$d_{12} = \sqrt{a_{12}^2 + b_{12}^2} = \sqrt{12^2 + 0^2} = \underline{\underline{12 \text{ m}}} \quad (5.4)$$

$$d_{23} = \sqrt{a_{23}^2 + b_{23}^2} = \sqrt{12^2 + 0^2} = \underline{\underline{12 \text{ m}}} \quad (5.5)$$

$$d_{13} = \sqrt{a_{13}^2 + b_{13}^2} = \sqrt{24^2 + 0^2} = \underline{\underline{24 \text{ m}}} \quad (5.6)$$

Indukčnost prvního vodiče (5.7):

$$L_1 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r_e} + \frac{0,05}{n} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{12 \cdot 24}}{0,118} + \frac{0,05}{3} = \underline{\underline{1,009 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.7)$$

Indukčnost druhého vodiče (5.8):

$$L_2 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{23}}}{r_e} + \frac{0,05}{n} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{12 \cdot 12}}{0,118} + \frac{0,05}{3} = \underline{\underline{0,94 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.8)$$

Indukčnost třetího vodiče (5.9):

$$L_3 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{23}}}{r_e} + \frac{0,05}{n} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{24 \cdot 12}}{0,118} + \frac{0,05}{3} = \underline{\underline{1,009 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.9)$$

Střední indukčnost vedení (5.10):

$$L_k = \frac{1}{3} \cdot (L_1 + L_2 + L_3) = \frac{1}{3} \cdot (1,009 + 0,94 + 1,009) = \underline{\underline{0,986 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.10)$$

Reaktance vedení (5.11):

$$X_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,9862 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,31 \Omega \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.11)$$

Vzdálenost vodičů nad zemí (5.12):

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = \sqrt[3]{17,98 \cdot 17,98 \cdot 17,98} = \underline{\underline{17,98 \text{ m}}} \quad (5.12)$$

Vzdálenost obrazů vodičů (5.13, 5.14, 5.15):

$$D_{12'} = \sqrt{A_{12'}^2 + B_{12'}^2} = \sqrt{12^2 + 35,96^2} = \underline{\underline{37,909 \text{ m}}} \quad (5.13)$$

$$D_{23'} = \sqrt{A_{23'}^2 + B_{23'}^2} = \sqrt{12^2 + 35,96^2} = \underline{\underline{37,909 \text{ m}}} \quad (5.14)$$

$$D_{13'} = \sqrt{A_{13'}^2 + B_{13'}^2} = \sqrt{24^2 + 35,96^2} = \underline{\underline{43,233 \text{ m}}} \quad (5.15)$$

Kapacita prvního vodiče (5.16):

$$C_1 = \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r_e} \cdot \frac{2 \cdot m}{\sqrt{D_{12'} \cdot D_{13'}}}} = \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt{12 \cdot 24}}{0,118} \cdot \frac{2 \cdot 17,98}{\sqrt{37,909 \cdot 43,233}}} = \underline{\underline{11,489 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.16)$$

Kapacita druhého vodiče (5.17):

$$C_2 = \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{23}}}{r_e} \cdot \frac{2 \cdot m}{\sqrt{D_{12'} \cdot D_{23'}}}} = \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt{12 \cdot 12}}{0,118} \cdot \frac{2 \cdot 17,98}{\sqrt{37,909 \cdot 37,909}}} = \underline{\underline{12,195 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.17)$$

Kapacita třetího vodiče (5.18):

$$C_3 = \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt{d_{23} \cdot d_{13}}}{r_e} \cdot \frac{2 \cdot m}{\sqrt{D_{23'} \cdot D_{13'}}}} = \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt{12 \cdot 24}}{0,118} \cdot \frac{2 \cdot 17,98}{\sqrt{37,909 \cdot 43,233}}} = \underline{\underline{11,489 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.18)$$

Střední indukčnost vedení (5.19):

$$C_k = \frac{1}{3} \cdot (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{3} \cdot (11,489 \cdot 10^{-3} + 12,195 \cdot 10^{-3} + 11,489 \cdot 10^{-3}) = \underline{\underline{11,724 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.19)$$

Susceptance vedení (5.20):

$$B_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 11,724 \cdot 10^{-9} = \underline{\underline{3,683 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.20)$$

Svodová vodivost hodnota pro 400 kV z tab. č. 2. 1. (5.21):

$$G_k = \underline{\underline{0,02 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}}} \quad (5.21)$$

5.2 Výpočet náhradního schématu vedení pomocí π - článku

Řešení pomocí π -článku pro délku vedení 165 km:

Délka vedení 165 km byla zvolena, aby nastavené parametry na modelu (R , L , C) vycházely stejně jako vypočítané.

Výpočet Blondelových konstant pro vzdálenost 165 km (5.22, 5.23, 5.24):

$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{2} = 1 + \frac{(0,029 + j 0,31) \cdot (0,02 \cdot 10^{-6} + j 3,683 \cdot 10^{-6}) \cdot 165^2}{2} = (0,985 + j 0,002) = \underline{\underline{0,985 \angle 0,116^\circ}} \quad (5.22)$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_K \cdot \ell = (0,029 + j 0,31) \cdot 165 = (4,785 + j 51,15) = \underline{\underline{51,373 \angle 84,656^\circ}} \text{ S} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \bar{Y}_K \cdot \ell \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{4} \right) = (0,02 \cdot 10^{-6} + j 3,683 \cdot 10^{-6}) \cdot 165 \cdot \left(1 + \frac{(0,029 + j 0,31) \cdot (0,02 \cdot 10^{-6} + j 3,683 \cdot 10^{-6}) \cdot 165^2}{4} \right) = \\ &= 2,807 \cdot 10^{-6} + j 6,03 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{6,03 \cdot 10^{-4} \angle 89,733^\circ}} \text{ } \Omega \quad (5.24) \end{aligned}$$

Výpočet pro přenos vedení naprázdno:

Proud na konci (5.25):

$$\underline{\underline{I_2 = 0 \text{ A}}} \quad (5.25)$$

Výpočet napětí a proudu na začátku (5.26, 5.27):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,985 + j 0,002) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (4,785 + j 51,15) \cdot 0 = \\ &= (2,274 \cdot 10^5 + j 3,553 \cdot 10^2) = \underline{\underline{227400,278 \angle 0,09^\circ}} \text{ V} \quad (5.26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (2,807 \cdot 10^{-6} + j 6,03 \cdot 10^{-4}) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (0,985 + j 0,002) \cdot 0 = \\ &= (0,648 + j 139,25) = \underline{\underline{139,252 \angle 89,733^\circ}} \text{ A} \quad (5.27) \end{aligned}$$

Účinník na začátku (5.28, 5.29):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 0,09 - (89,733) = \underline{\underline{-89,643^\circ}} \quad (5.28)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-89,643^\circ) = \underline{\underline{0,0062}} \quad (5.29)$$

Činný výkon na začátku vedení (5.30):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 227400,278 \cdot 139,252 \cdot 0,0062 = \underline{\underline{0,588 \text{ MW}}} \quad (5.30)$$

Výpočet pro přenos vedení nakrátko:

Proud na konci (5.31):

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{300 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} = \underline{\underline{433,013 \text{ A}}} \quad (5.31)$$

Napětí na konci (5.32):

$$U_2 = \underline{\underline{0 \text{ V}}} \quad (5.32)$$

Výpočet napětí a proudu na začátku (5.33, 5.34):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,985 + j 0,002) \cdot 0 + (4,785 + j 51,15) \cdot 433,013 = \\ &= (2,761 \cdot 10^3 + j 29,514 \cdot 10^3) = \underline{\underline{22245,705 \angle 84,656^\circ \text{ V}}} \quad (5.33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (2,807 \cdot 10^{-6} + j 6,03 \cdot 10^{-4}) \cdot 0 + (0,985 + j 0,002) \cdot 433,013 = \\ &= (568,04 + j 0,885) = \underline{\underline{426,291 \angle 0,089^\circ \text{ A}}} \quad (5.34) \end{aligned}$$

Účinník na začátku vedení (5.35, 5.36):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 84,656 - (0,089) = \underline{\underline{84,567^\circ}} \quad (5.35)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(84,567^\circ) = \underline{\underline{0,095}} \quad (5.36)$$

Činný výkon na začátku vedení (5.37):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 22245,705 \cdot 426,291 \cdot 0,095 = \underline{\underline{2,703 \text{ MW}}} \quad (5.37)$$

Výpočet pro přenos přirozeného výkonu:

Výpočet vlnová impedance (5.38):

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}_K}{\bar{Y}_K}} = \sqrt{\frac{(0,029 + j 0,31)}{(2 \cdot 10^{-8} + j 3,683 \cdot 10^{-6})}} = (290,47 - j 12,767) = \underline{\underline{290,75 \angle -2,517^\circ \Omega}} \quad (5.38)$$

Zdánlivý výkon na konci (5.39):

$$S_2 = \frac{U_2^2}{Z_v} = \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{(290,47 - j 12,767)} = (549,77 \cdot 10^6 + j 24,163 \cdot 10^6) = \underline{\underline{550,301 \cdot 10^6 \angle 2,517^\circ \text{ VA}}} \quad (5.39)$$

Proud na konci (5.40):

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{(549,77 \cdot 10^6 + j 24,163 \cdot 10^6)}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} = (793,525 + j 34,876) = \underline{\underline{794,291 \angle 2,517^\circ \text{ A}}} \quad (5.40)$$

Napětí a proud na začátku vedení (5.41, 5.42):

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,985 + j 0,002) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (4,785 + j 51,15) \cdot (793,525 + j 34,876) = \\ &= (2,294 \cdot 10^5 + j 4,111 \cdot 10^4) = \underline{\underline{233054,483 \angle 10,161^\circ \text{ V}}} \quad (5.41)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (-2,807 \cdot 10^{-6} + j 6,03 \cdot 10^{-4}) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (0,985 + j 0,002) \cdot (793,525 + j 34,876) = \\ &= (781,79 + j 174,81) = \underline{\underline{801,096 \angle 12,604^\circ \text{ A}}} \quad (5.42)\end{aligned}$$

Účinník (5.43, 5.44):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 10,161 - (12,604) = \underline{\underline{-2,443^\circ}} \quad (5.43)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-2,443^\circ) = \underline{\underline{0,999}} \quad (5.44)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (5.45):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 233054,483 \cdot 801,096 \cdot 0,999 = \underline{\underline{559,53 \text{ MW}}} \quad (5.45)$$

Činný výkon odebíraný z vedení (5.486):

$$P_2 = 3 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 230940 \cdot 794,291 \cdot 0,99 = \underline{\underline{544,797 \text{ MW}}} \quad (5.46)$$

Ztráty ve vedení (5.47):

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 559,53 \cdot 10^6 - 544,797 \cdot 10^6 = \underline{\underline{14,733 \text{ MW}}} \quad (5.47)$$

Účinnost (5.48):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{544,797 \cdot 10^6}{559,3 \cdot 10^6} \cdot 100 = \underline{\underline{97,407 \%}} \quad (5.48)$$

Řešení pomocí π -článku pro délku vedení 300 km:

Délka vedení 165 km byla zvolena, aby nastavené parametry na modelu (R , L , C) vycházely stejně jako vypočítané.

Výpočet Blondelových konstant pro vzdálenost 300 km (5.49, 5.50, 5.51):

$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{2} = 1 + \frac{(0,029 + j 0,31) \cdot (0,02 \cdot 10^{-6} + j 3,683 \cdot 10^{-6}) \cdot 300^2}{2} = (0,949 + j 0,005) = \underline{\underline{0,949 \angle 0,302^\circ}} \quad (5.49)$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_K \cdot \ell = (0,029 + j 0,31) \cdot 300 = (8,7 + j 93) = \underline{\underline{93,406 \angle 84,656^\circ \text{ S}}} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned}\bar{C} &= \bar{Y}_K \cdot \ell \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{4} \right) = (0,02 \cdot 10^{-6} + j 3,683 \cdot 10^{-6}) \cdot 300 \cdot \left(1 + \frac{(0,029 + j 0,31) \cdot (0,02 \cdot 10^{-6} + j 3,683 \cdot 10^{-6}) \cdot 300^2}{4} \right) = \\ &= 3,034 \cdot 10^{-6} + j 1,076 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{1,076 \cdot 10^{-3} \angle 89,838^\circ \Omega}} \quad (5.51)\end{aligned}$$

Výpočet pro přenos vedení naprázdno:

Proud na konci (5.52):

$$\underline{I_2 = 0 \text{ A}} \quad (5.52)$$

Výpočet napětí a proudu na začátku (5.53, 5.54):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,949 + j 0,005) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (8,7 + j 93) \cdot 0 = \\ &= (2,191 \cdot 10^5 + j 1,174 \cdot 10^3) = \underline{219103,145 \angle 0,307^\circ \text{ V}} \quad (5.53) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (3,034 \cdot 10^{-6} + j 1,076 \cdot 10^{-4}) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (0,949 + j 0,005) \cdot 0 = \\ &= (0,701 + j 248,62) = \underline{248,621 \angle 89,838^\circ \text{ A}} \quad (5.54) \end{aligned}$$

Účinník na začátku (5.55, 5.56):

$$\varphi_1 = \varphi_{IU} - \varphi_{II} = 0,307 - (89,838) = \underline{-89,531^\circ} \quad (5.55)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-89,531^\circ) = \underline{0,0082} \quad (5.56)$$

Činný výkon na začátku vedení (5.57):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 219103,145 \cdot 248,621 \cdot 0,0082 = \underline{1,34 \text{ MW}} \quad (5.57)$$

Výpočet pro přenos vedení nakrátko:

Proud na konci (5.58):

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{300 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} = \underline{433,013 \text{ A}} \quad (5.58)$$

Napětí na konci (5.59):

$$\underline{U_2 = 0 \text{ V}} \quad (5.59)$$

Výpočet napětí a proudu na začátku (5.60, 5.61):

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,949 + j 0,005) \cdot 0 + (8,7 + j 93) \cdot 433,013 = \\ &= (5,02 \cdot 10^3 + j 53,661 \cdot 10^3) = \underline{40271,762 \angle 84,656^\circ \text{ V}} \quad (5.60) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (3,034 \cdot 10^{-6} + j 1,076 \cdot 10^{-3}) \cdot 0 + (0,949 + j 0,005) \cdot 433,013 = \\ &= (547,37 + j 2,934) = \underline{410,786 \angle 0,307^\circ \text{ A}} \quad (5.61) \end{aligned}$$

Účinník na začátku vedení (5.62, 5.63):

$$\varphi_1 = \varphi_{IU} - \varphi_{II} = 84,656 - (0,307) = \underline{84,349^\circ} \quad (5.62)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(84,349^\circ) = \underline{\underline{0,098}} \quad (5.63)$$

Činný výkon na začátku vedení (5.64):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 40271,762 \cdot 410,786 \cdot 0,098 = \underline{\underline{4,864 \text{ MW}}} \quad (5.64)$$

Výpočet pro přenos přirozeného výkonu:

Výpočet vlnová impedance (5.65):

$$\overline{Z_v} = \sqrt{\frac{\overline{Z_K}}{\overline{Y_K}}} = \sqrt{\frac{(0,029 + j0,31)}{(2 \cdot 10^{-8} + j3,683 \cdot 10^{-6})}} = (290,47 - j12,767) = \underline{\underline{290,75 \angle -2,517^\circ \Omega}} \quad (5.65)$$

Zdánlivý výkon na konci (5.66):

$$S_2 = \frac{U_2^2}{Z_v} = \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{(290,47 - j12,767)} = (549,77 \cdot 10^6 + j24,163 \cdot 10^6) = \underline{\underline{550,301 \cdot 10^6 \angle 2,517^\circ \text{ VA}}} \quad (5.66)$$

Proud na konci (5.67):

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{(549,77 \cdot 10^6 + j24,163 \cdot 10^6)}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} = (793,525 + j34,876) = \underline{\underline{794,291 \angle 2,517^\circ \text{ A}}} \quad (5.67)$$

Napětí a proud na začátku vedení (5.68, 5.69):

$$\begin{aligned} \overline{U}_1 &= \overline{A} \cdot \overline{U}_{2f} + \overline{B} \cdot \overline{I}_2 = (0,949 + j0,005) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (8,7 + j93) \cdot (793,525 + j34,876) = \\ &= (2,227 \cdot 10^5 + j7,528 \cdot 10^4) = \underline{\underline{235079,494 \angle 18,677^\circ \text{ V}}} \quad (5.68) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{I}_1 &= \overline{C} \cdot \overline{U}_{2f} + \overline{A} \cdot \overline{I}_2 = (3,034 \cdot 10^{-6} + j1,076 \cdot 10^{-3}) \cdot 230,94 \cdot 10^3 + (0,949 + j0,005) \cdot (793,525 + j34,876) = \\ &= (753,29 + j285,74) = \underline{\underline{805,33 \angle 20,773^\circ \text{ A}}} \quad (5.69) \end{aligned}$$

Účinník (5.70, 5.71):

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 18,677 - (20,773) = \underline{\underline{-2,096^\circ}} \quad (5.70)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(-2,444^\circ) = \underline{\underline{0,999}} \quad (5.71)$$

Činný výkon dodávaný do vedení (5.72):

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 235079,494 \cdot 805,33 \cdot 0,999 = \underline{\underline{567,381 \text{ MW}}} \quad (5.72)$$

Činný výkon odebíraný z vedení (5.73):

$$P_2 = 3 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 230940 \cdot 794,291 \cdot 0,99 = \underline{\underline{544,797 \text{ MW}}} \quad (5.73)$$

Ztráty ve vedení (5.74):

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 567,381 \cdot 10^6 - 544,797 \cdot 10^6 = \underline{\underline{22,584 \text{ MW}}} \quad (5.74)$$

Účinnost (5.75):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{544,797 \cdot 10^6}{567,381 \cdot 10^6} \cdot 100 = \underline{\underline{96,02 \%}} \quad (5.75)$$

5.3 Návrh laboratorního měření

Zadání

1. Měřením na náhradním modelu vedení změřte velikost proudu, napětí, výkonu a účinnku na začátku a na konci vedení.
2. Sestrojte grafickou závislost veličin na konci vedení na hodnotě P_2 .
3. Porovnejte naměřené hodnoty pro různá napětí U_1 .

Teoretický rozbor

Měření je provedeno pro hodnoty vstupního napětí $U_1 = 50, 100, 150, 200, 230,9$ a 250 V . U modelu vedení nastavujeme hodnoty odporu, indukčnosti a kapacity. Vedení je řešeno pro délky 165 a 300 km. U modelu vedení je na konci připojena zátěž, kterou měníme velikost protékajícího proudu od stavu naprázdno, kdy je hodnota zátěže největší a proud takřka nulový. Po stav nakrátko kdy je hodnota zátěže nejmenší a teče největší proud, tím dochází k poklesu napětí na konci modelu vedení. Měření provádíme pro přenos při stavech naprázdno, nakrátko a pro přirozený výkon. Jednotka pro simulaci přenosových vedení je řešena trojfázově jako souměrný pasivní čtyřpól. Vedení je nahrazeno článkem Π a je popsáno soustavou rovnic (5.76, 5.77):

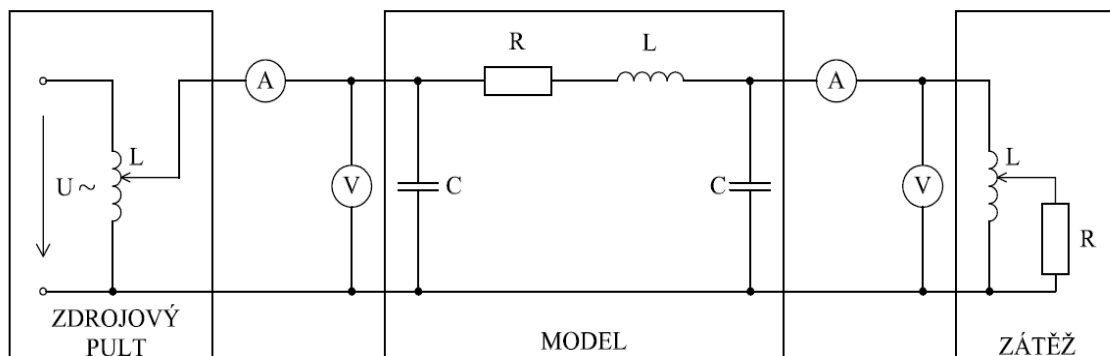
$$\bar{U}_1 = \bar{A}\bar{U}_2 + \bar{B}\bar{I}_2 \quad (5.76)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C}\bar{U}_2 + \bar{D}\bar{I}_2 \quad (5.77)$$

$\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ jsou tzv. Blondelovy konstanty vedení. Pro souměrný čtyřpól, tedy i pro vedení platí: $\bar{A} = \bar{D}$

Technické údaje modelu:

Jmenovité napětí	230 / 400 V AC
Jmenovitý proud	2 A
Jmenovitá frekvence	50 Hz

Schéma zapojení:

Obr. 5.2: Jednofázové schéma zapojení

Postup měření:

1. Provést zapojení dle schématu viz Obr. 5. 1.
2. Vypočítat modelové hodnoty proudů a napětí na začátku vedení pro $P_2 = 100\%$ zadaného výkonu $P_2 = 300$ MW.
3. Měření provést pro délky vedení 165 a 300 km.
4. Pomocí proměnlivé zátěže R a zdroje napětí nastavit modelové hodnoty na začátku vedení a odečíst příslušné hodnoty na konci vedení.

Nastavené parametry na modelu:

Pro délku vedení 165 km:

$$R = 4,762 \, \Omega, L = 163 \, \text{mH} \approx 161 \, \text{mH}, C = 0,97 \, \mu\text{F} \approx 1 \, \mu\text{F}$$

Pro délku vedení 300 km:

$$R = 8,658 \, \Omega, L = 296 \, \text{mH} \approx 273 \, \text{mH}, C = 1,76 \, \mu\text{F} \approx 2 \, \mu\text{F}$$

$$m_U = 10^{-3}, m_I = 10^{-3}, m_Z = 1$$

Vypracování:**Použité přístroje při měření:**

Analyzátor kvality elektrické energie - Elcom ENA 330.11, výr. číslo: EVIP080147

Zdrojový pult 3x380/220 V, 110 V ss, výr. č. 16096

Zdrojový pult 3x380/220 V, 110 V ss, výr. č. 16454

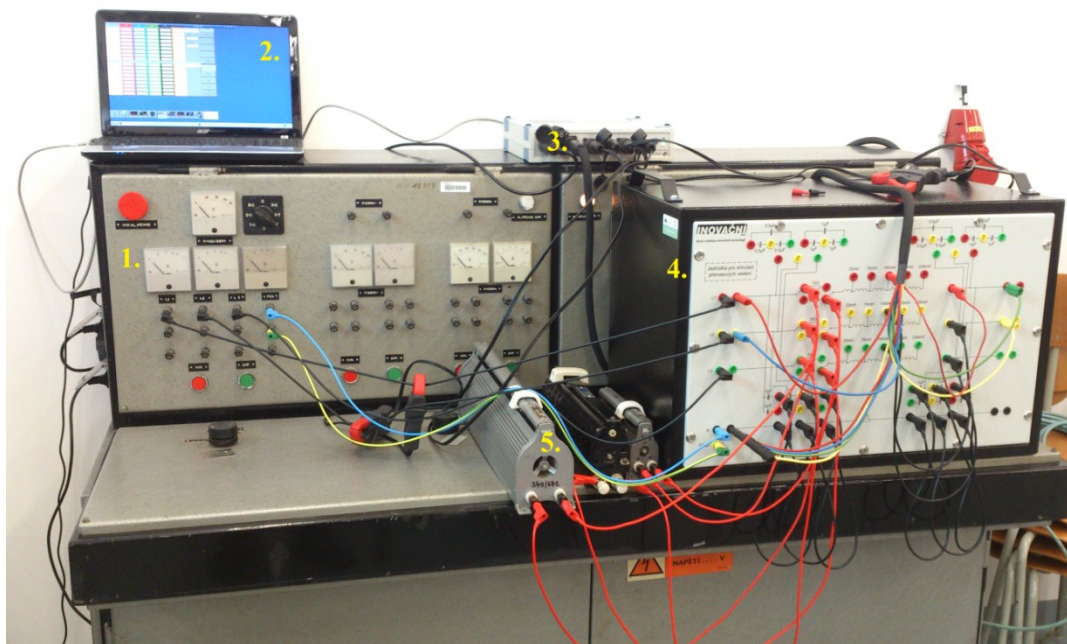
Jednotka pro simulaci přenosových vedení, výr. č. 80-015

Reostat – $13,7 \, \Omega / 6,3 \, \text{A}$; výr. č. 34900516

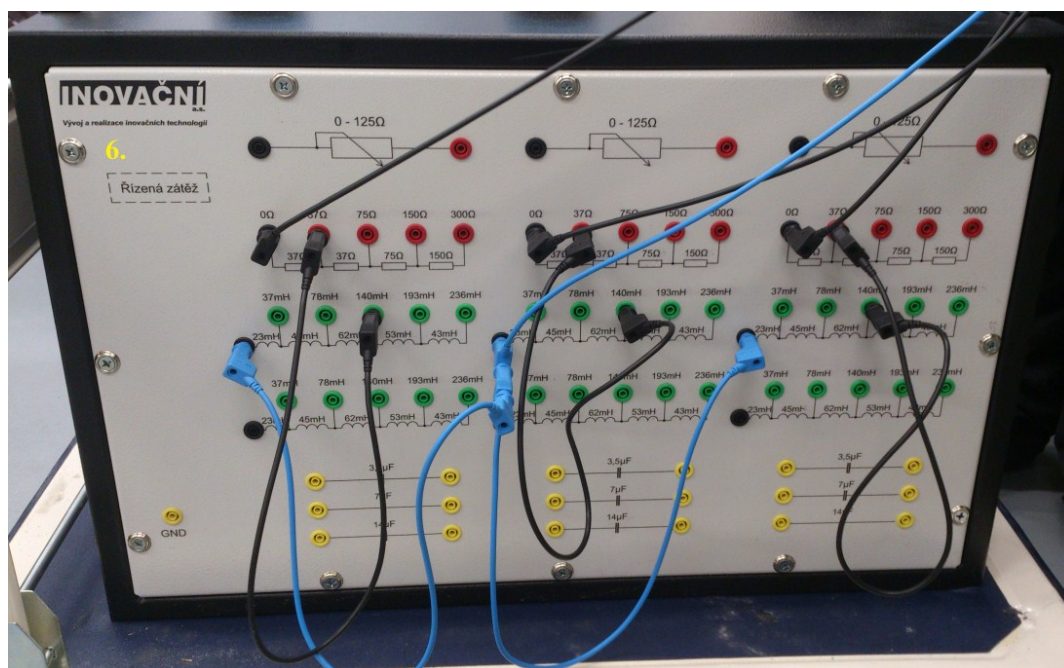
Reostat – $6,7 \, \Omega / 10 \, \text{A}$; výr. č. 34900542

Reostat – $3,8 \, \Omega / 8 \, \text{A}$; výr. č. 34900516

Řízená zátěž, výr. č. 80-014

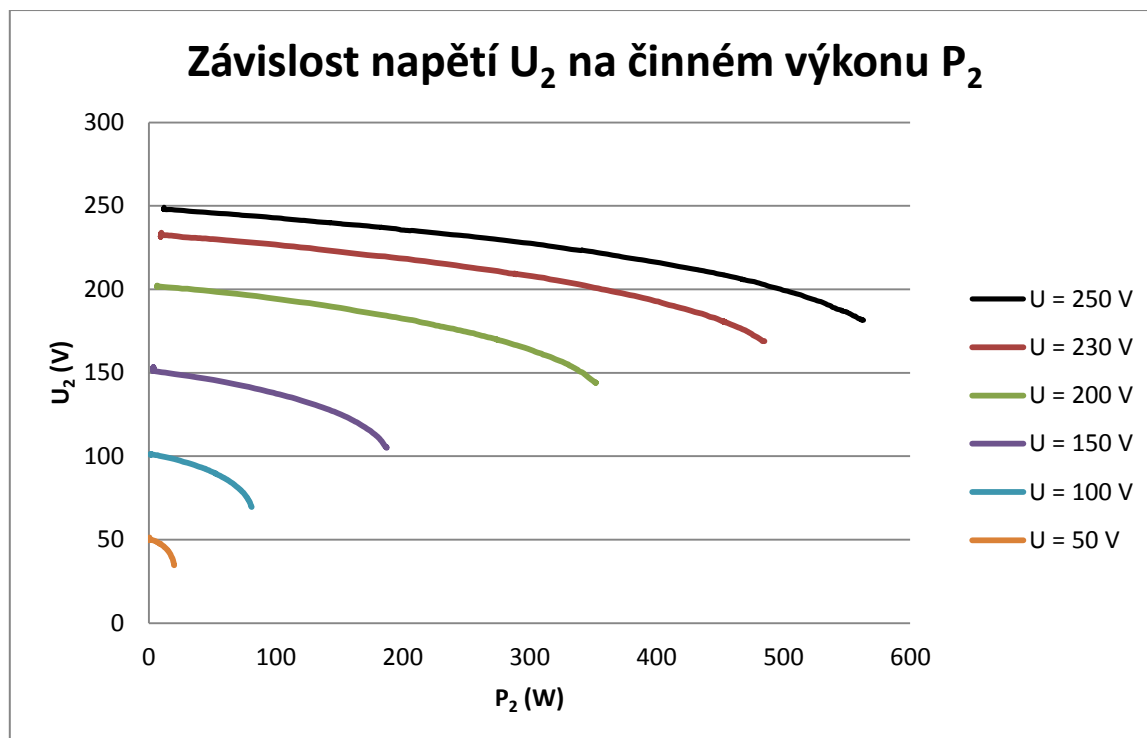
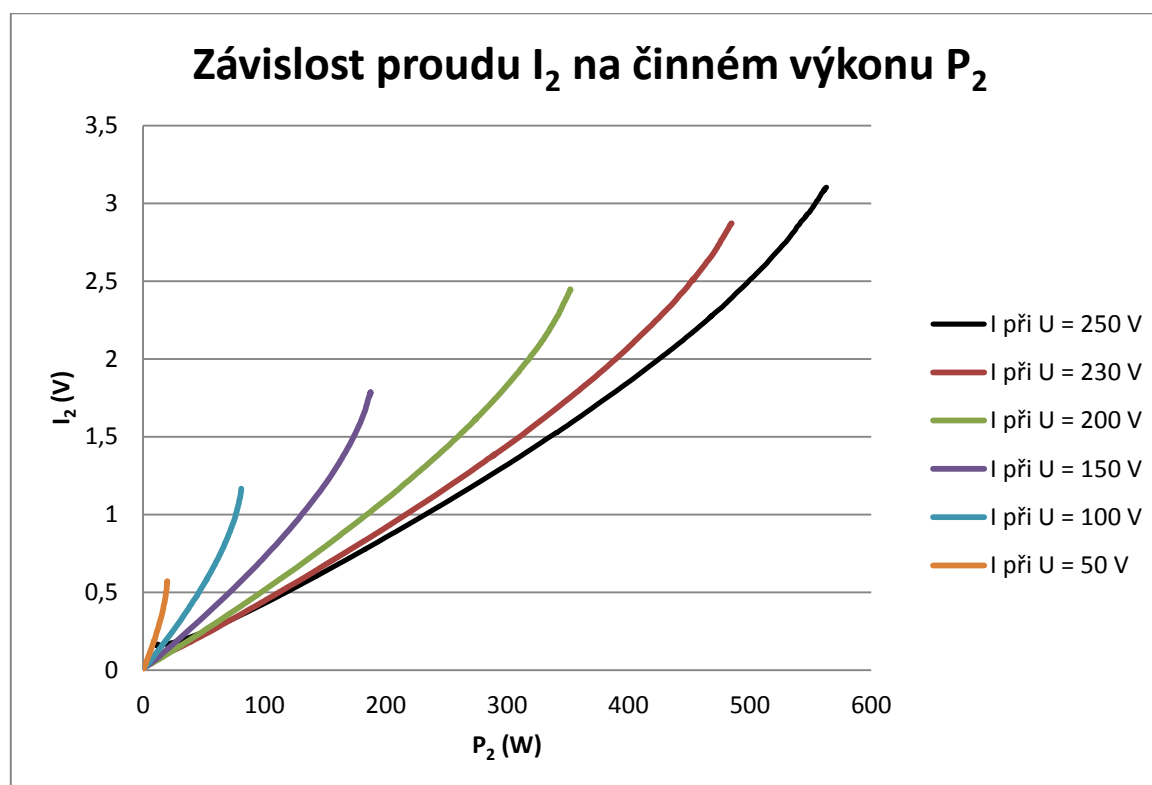
Zapojení měření:

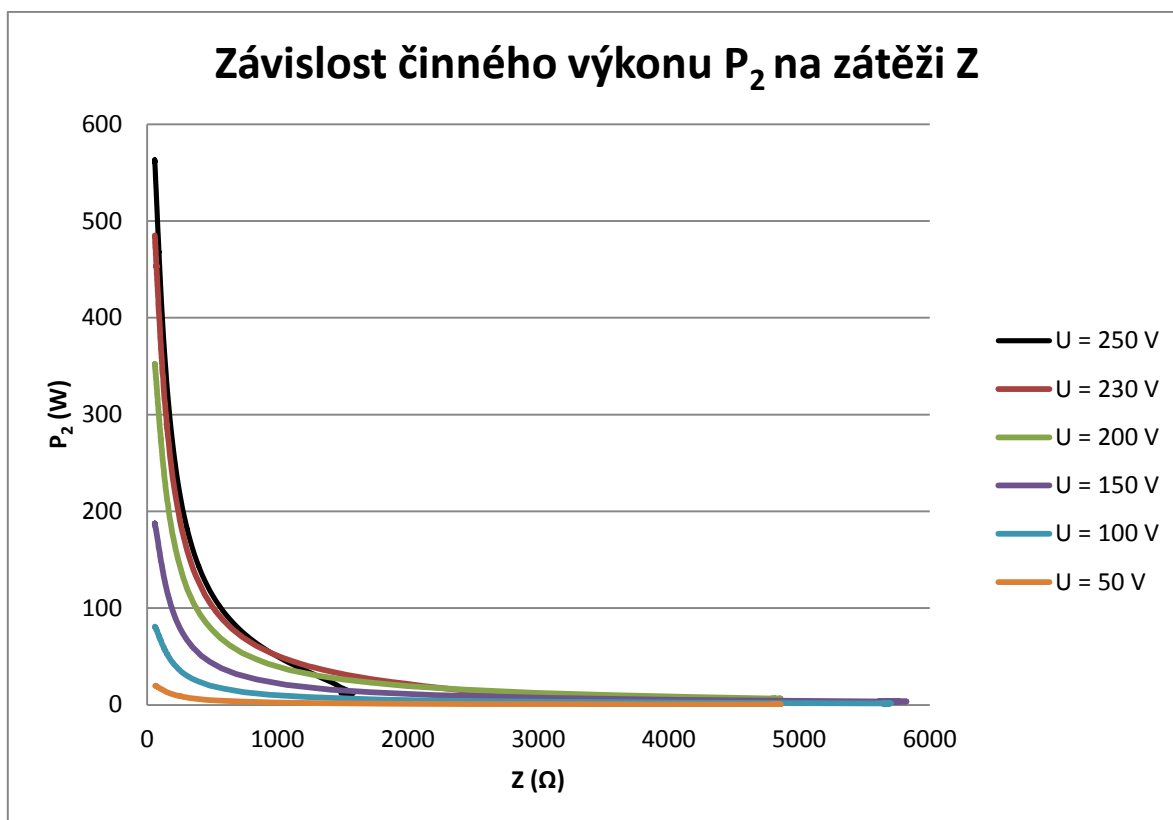
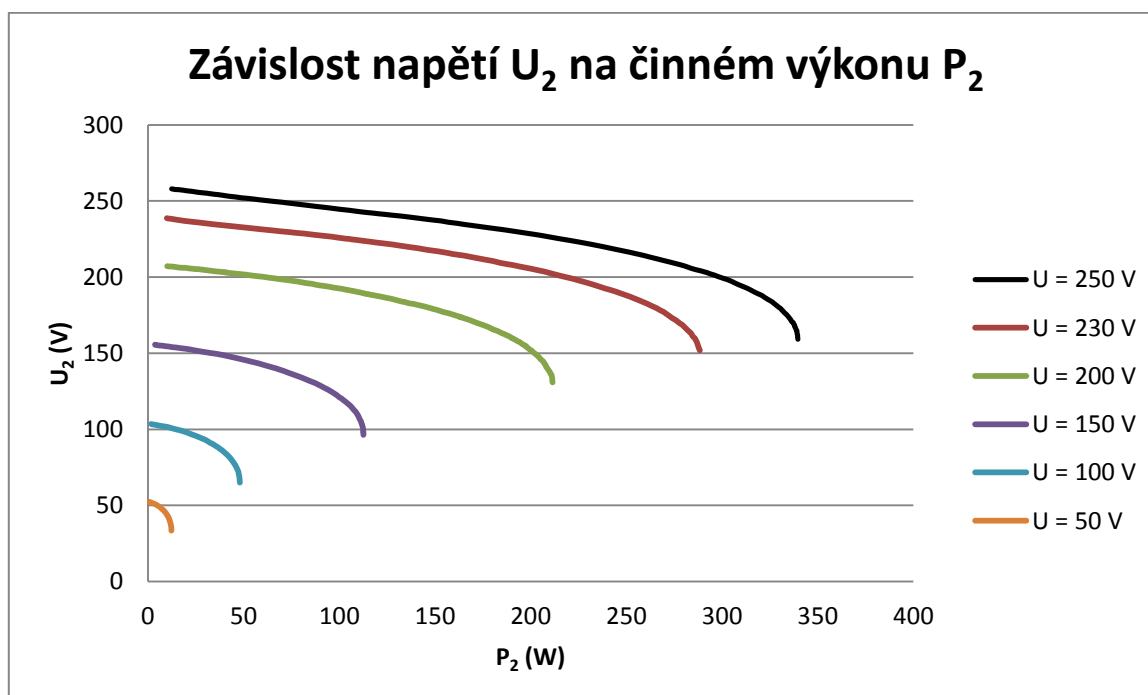
Obr. 5.3: Zapojené měření

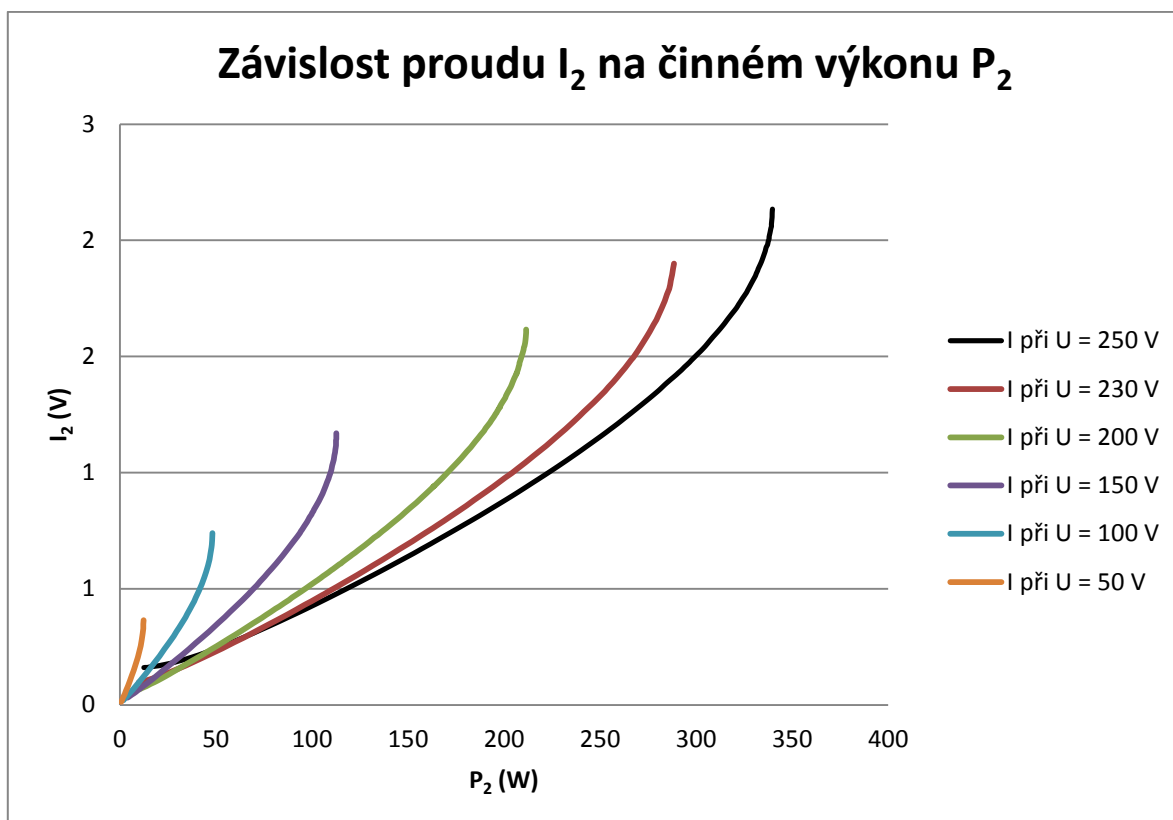
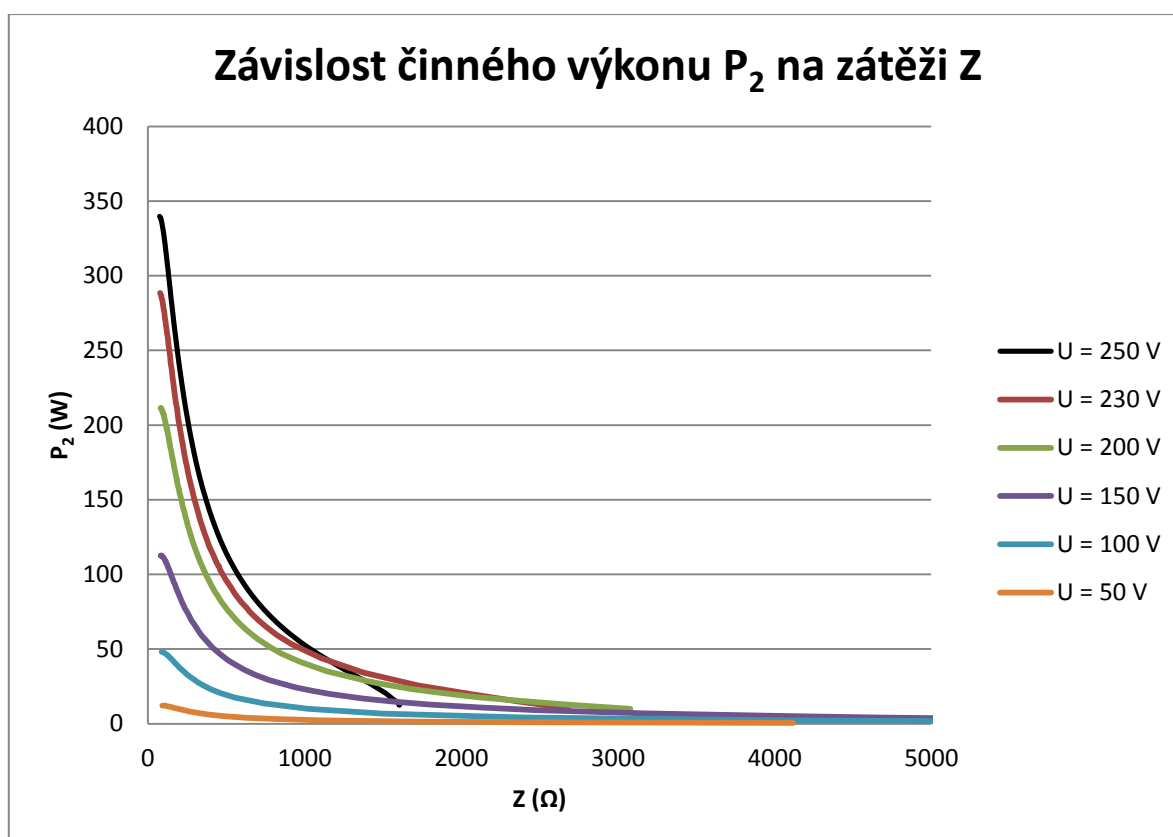


Obr. 5.4: Řízená zátěž

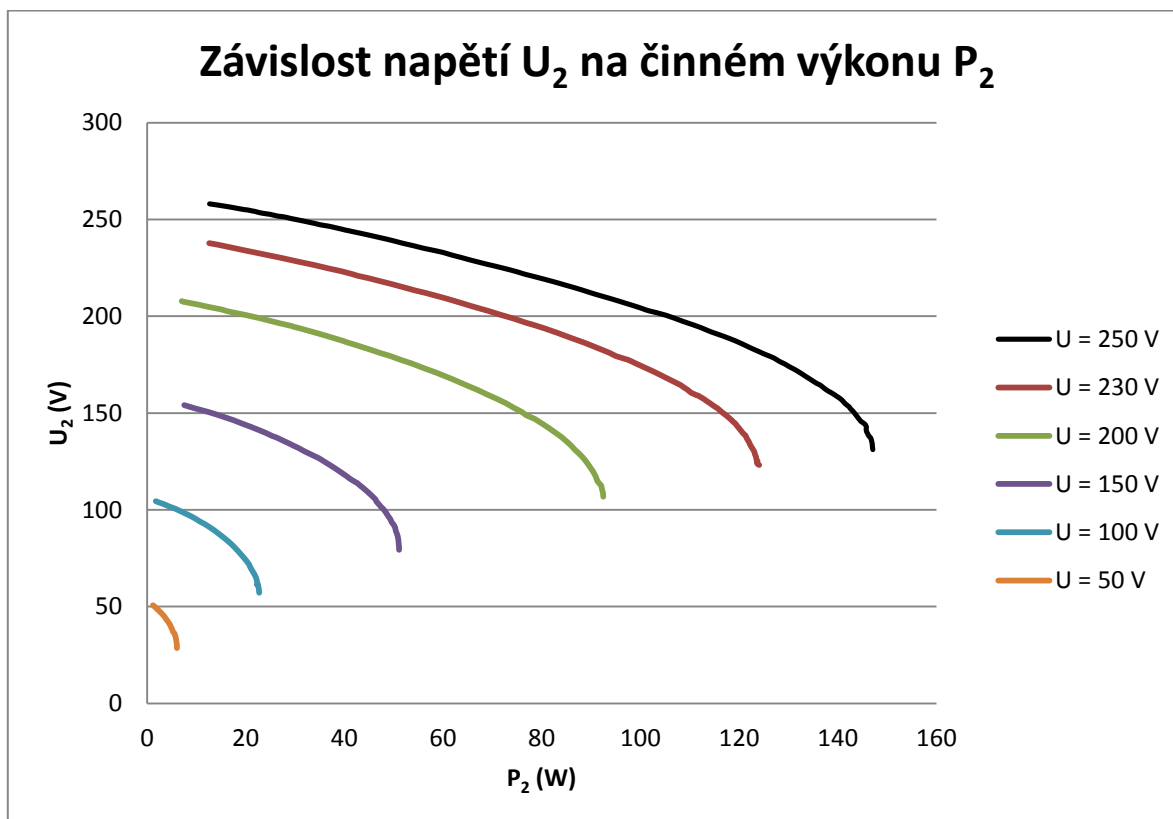
1. Zdrojový pult
2. Notebook
3. Analyzátor kvality elektrické energie
4. Jednotka pro simulaci přenosových vedení
5. Reostat
6. Řízená zátěž

Měření přenosové schopnosti pro délku vedení 165 km:Graf 5.1: Závislost napětí U_2 na činném výkonu P_2 Graf 5.2: Závislost proudu I_2 na činném výkonu P_2

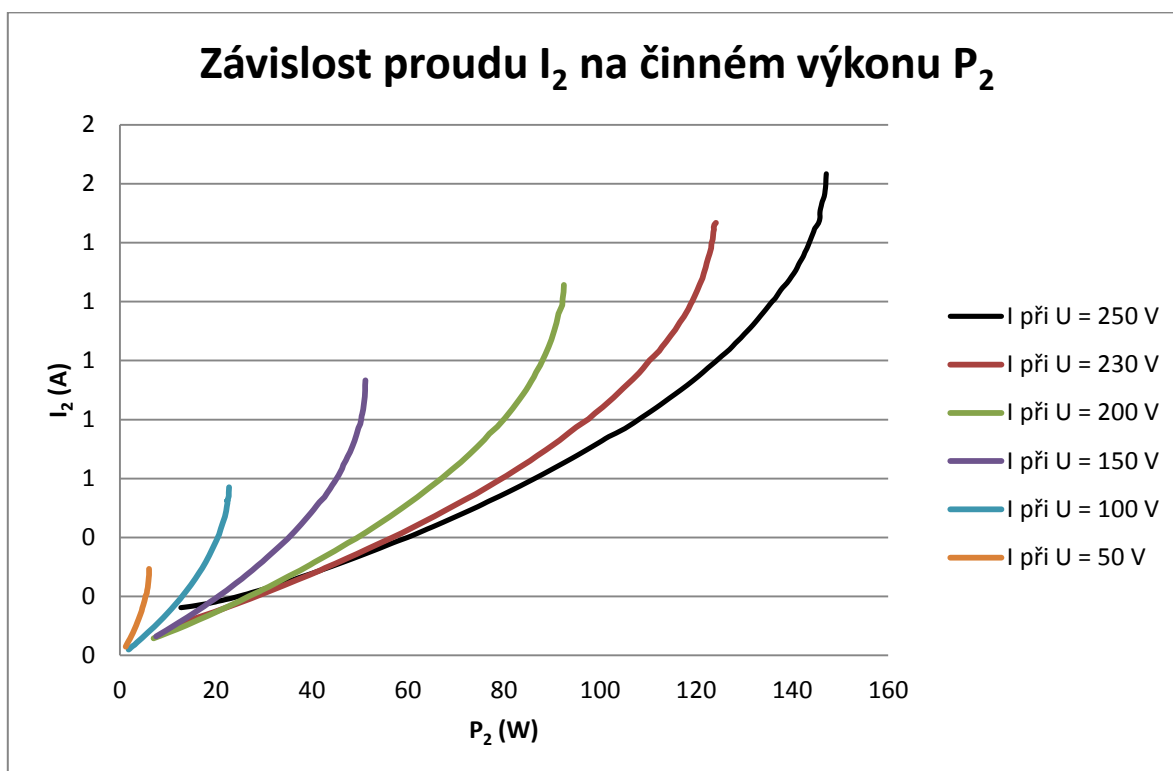
Graf 5.3: Závislost činného výkonu P_2 na zátěži Z **Měření přenosové schopnosti pro délku vedení 300 km:****a) Odporová zátěž**Graf 5.4: Závislost napětí U_2 na činném výkonu P_2

Graf 5.5: Závislost proudu I_2 na činném výkonu P_2 Graf 5.6: Závislost činného výkonu P_2 na zátěži Z

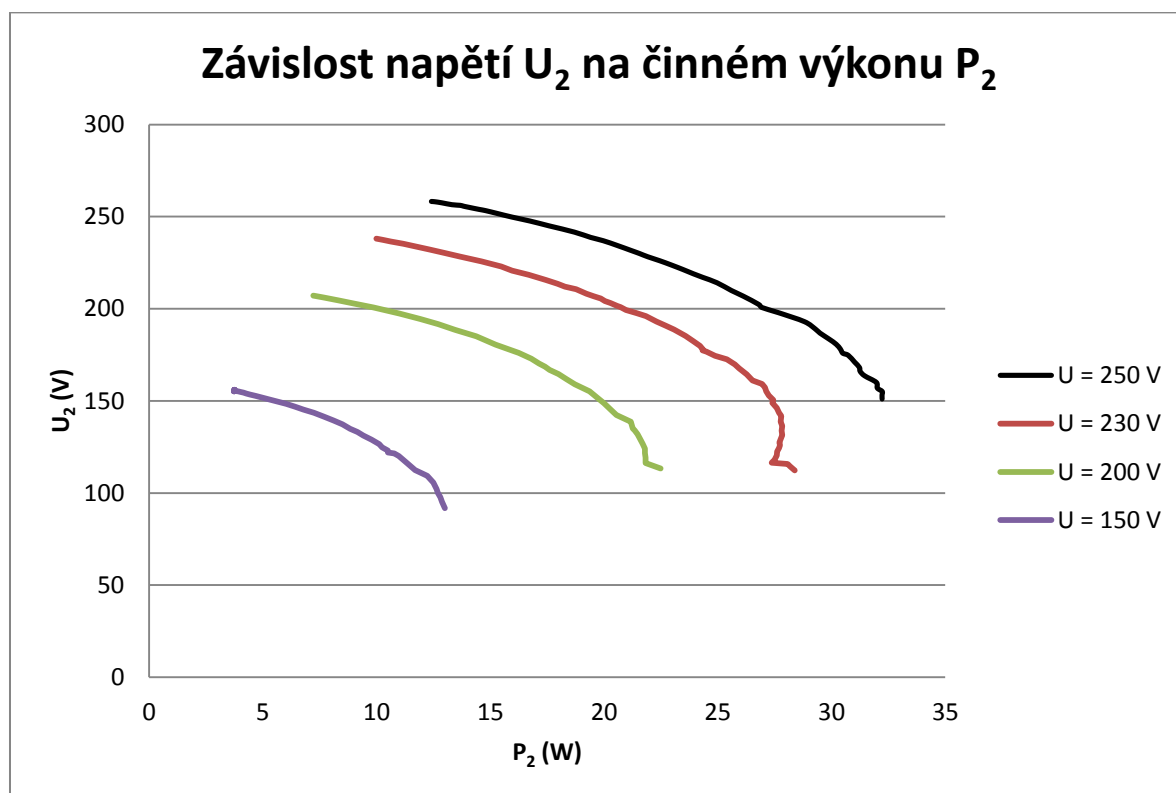
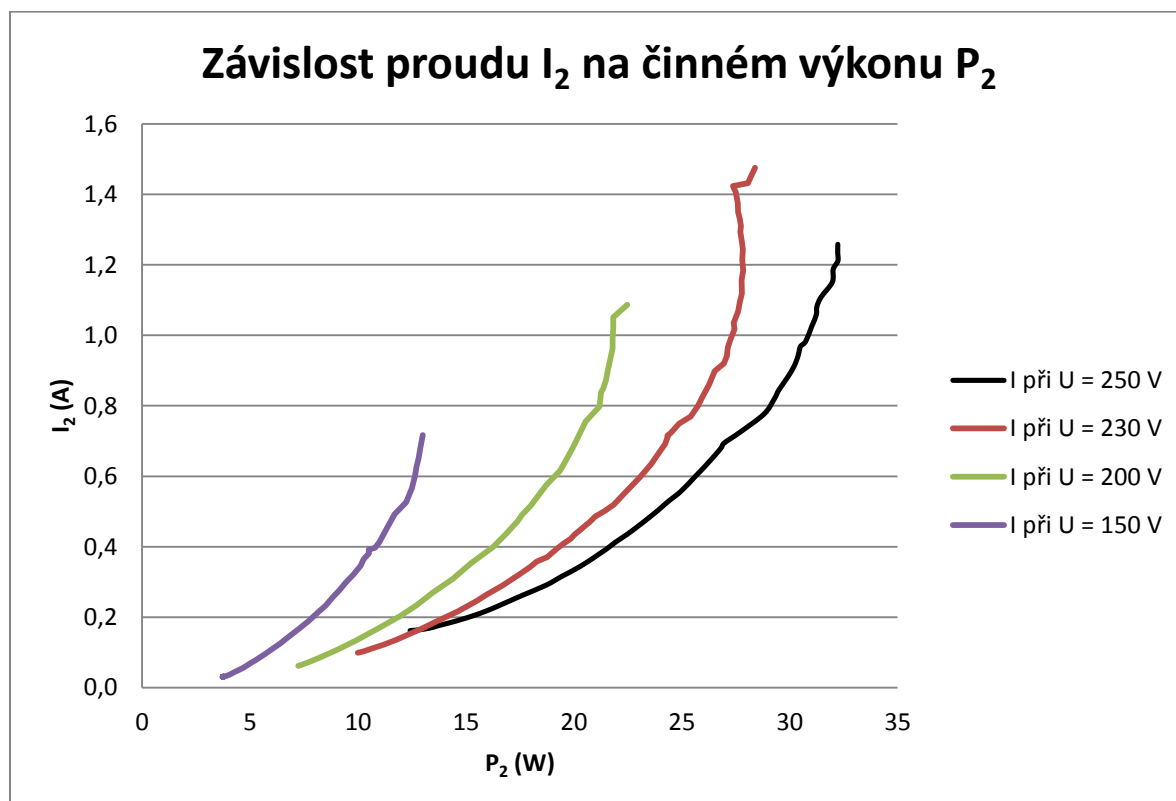
b) Odporová a indukční zátěž ($R = 37 \, \Omega$ a $L = 159 \, \text{mH}$)



Graf 5.7: Závislost napětí U_2 na činném výkonu P_2



Graf 5.8: Závislost proudu I_2 na činném výkonu P_2

c) Indukční zátěž ($L = 268 \text{ mH}$)Graf 5.9: Závislost napětí U_2 na činném výkonu P_2 Graf 5.10: Závislost proudu I_2 na činném výkonu P_2

5.4 Porovnání výsledků

Pro délku vedení 165 km:

Tab. 5.1: Přenos vedení naprázdno

U ₂ = 50 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	49,3 kV	50 kV	0,03 kA	0	0,028 MW	0	-89,6
Měření	49,9 V	50,6 V	0,03 A	0	0,067 W	0	-89,1
Rozdíl oproti výpočtům	1,22 %	1,2 %	0 %	0 %	139 %	0 %	0,5
U ₂ = 100 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	98,45 kV	100 kV	0,06 kA	0	0,11 MW	0	-89,6
Měření	98,9 V	100,4 V	0,06 A	0	0,263 W	0	-89,2
Rozdíl oproti výpočtům	0,46 %	0,4 %	0 %	0 %	139 %	0 %	0,4
U ₂ = 150 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	147,7 kV	150 kV	0,09 kA	0	0,248 MW	0	-89,6
Měření	146,6 V	148,9 V	0,1 A	0	0,589 W	0	-89,2
Rozdíl oproti výpočtům	-0,74 %	-0,73 %	10 %	0 %	138,5 %	0 %	0,4
U ₂ = 200 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	196,9 kV	200 kV	0,121 kA	0	0,445 MW	0	-89,6
Měření	196,1 V	199,2 V	0,13 A	0	0,987 W	0	-89,3
Rozdíl oproti výpočtům	-0,41 %	-0,6 %	7,4 %	0 %	121,8 %	0 %	0,3
U ₂ = 230,9 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	227,4 kV	230,9 kV	0,139 kA	0	0,588 MW	0	-89,6
Měření	227,4 V	231,1 V	0,15 A	0	1,28 W	0	-89,3
Rozdíl oproti výpočtům	0 %	0,09 %	7,9 %	0 %	117,69 %	0 %	0,3
U ₂ = 250 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	246,1 kV	250 kV	0,151 kA	0	0,695 MW	0	-89,6
Měření	246,35 V	250,3 V	0,16 A	0	1,502 W	0	-89,3
Rozdíl oproti výpočtům	0,1 %	0,1 %	6 %	0 %	116,12 %	0 %	0,3

Tab. 5.2: Přenos vedení nakrátko

I ₂ = 400 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	20,6 kV	0	0,394 kA	0,4 kA	2,306 MW	0	84,57
Měření	20,1 V	0	0,384 A	0,391 A	5,5 W	0	76,2
Rozdíl oproti výpočtům	-2,43 %	0 %	-2,54 %	-2,25 %	139 %	0 %	-8,37
I ₂ = 433 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	22,2 kV	0	0,426 kA	0,433 kA	2,703 MW	0	84,57
Měření	22,8 V	0	0,434 A	0,442 A	6,53 W	0	77,29
Rozdíl oproti výpočtům	2,7 %	0 %	1,88 %	2,08 %	142 %	0 %	-7,28
I ₂ = 500 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	25,7 kV	0	0,492 kA	0,5 kA	3,6 MW	0	84,57
Měření	25,2 V	0	0,481 A	0,49 A	9,11 W	0	75,48
Rozdíl oproti výpočtům	-1,95 %	0 %	-2,24 %	-2 %	153 %	0 %	-9,09
I ₂ = 667 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	34,2 kV	0	0,656 kA	0,667 kA	6,4 MW	0	84,57
Měření	34,1 V	0	0,65 A	0,65 A	16,65 W	0	75,38
Rozdíl oproti výpočtům	-0,29 %	0 %	-0,91 %	-2,55 %	160 %	0 %	-9,19
I ₂ = 1000 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	51,4 kV	0	0,984 kA	1 kA	14,4 MW	0	84,57
Měření	51,58 V	0	0,981 A	0,999 A	32 W	0	77,79
Rozdíl oproti výpočtům	0,35 %	0 %	-0,3 %	-0,1 %	122 %	0 %	-6,78
I ₂ = 2000 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	103 kV	0	1,969 kA	2 kA	57,7 MW	0	84,57
Měření	103,3 V	0	2,069 A	2,105 A	124,1 W	0	78,84
Rozdíl oproti výpočtům	0,29 %	0 %	5,08 %	5,25 %	115 %	0 %	-5,73

Tab. 5.3: Přenos přirozeného výkonu

U ₂ = 50 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	50,9 kV	50 kV	0,174 kA	0,172 kA	26,1 MW	25,5 MW	-2,4	290,8
Měření	49,7 V	47,9 V	0,17 A	0,17 A	25,2 W	24,3 W	-	283,3
Rozdíl oproti výpočtům	-1,58 %	-4,2 %	-1,73 %	-1,16 %	-3,45 %	-4,71 %	-	-2,58 %
U ₂ = 100 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	100,9 kV	100 kV	0,347 kA	0,344 kA	105 MW	102 MW	-2,4	290,8
Měření	100,2 V	96,3 V	0,339 A	0,339 A	102 W	99 W	-	283,8
Rozdíl oproti výpočtům	-0,69 %	-3,7 %	-2,31 %	-1,45 %	-2,86 %	-2,94 %	-	-2,41 %
U ₂ = 150 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	151,4 kV	150 kV	0,52 kA	0,516 kA	236 MW	230 MW	-2,4	290,8
Měření	149,3 V	143,4 V	0,502 A	0,502 A	225 W	216 W	-	285,3
Rozdíl oproti výpočtům	-1,39 %	-4,4 %	-3,46 %	-2,71 %	-4,66 %	-6,09 %	-	-1,89 %
U ₂ = 200 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	201,8 kV	200 kV	0,694 kA	0,688 kA	417 MW	408 MW	-2,4	290,8
Měření	199,7 V	191,8 V	0,66 A	0,66 A	396 W	381 W	-	290,1
Rozdíl oproti výpočtům	-1,04 %	-4,1 %	-4,9 %	-4,07 %	-5,04 %	-6,62 %	-	-0,24 %
U ₂ = 230,9 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	233,1 kV	230,9 kV	0,801 kA	0,794 kA	560 MW	545 MW	-2,4	290,8
Měření	230,6 V	220,5 V	0,779 A	0,784 A	537 W	516 W	-	281,3
Rozdíl oproti výpočtům	-1,1 %	-4,5 %	-2,75 %	-1,3 %	-4,11 %	-5,15 %	-	-3,3 %
U ₂ = 250 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	252,3 kV	250 kV	0,867 kA	0,859 kA	657 MW	639 MW	-2,4	290,8
Měření	247,9 V	236,3 V	0,818 A	0,828 A	606 W	582 W	-	285,4
Rozdíl oproti výpočtům	-1,78 %	-5,48 %	-5,65 %	-3,61 %	-7,76 %	-8,92 %	-	-1,86 %

Pro délku vedení 300 km:

Tab. 5.4: Přenos vedení naprázdno

U ₂ = 50 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	47,4 kV	50 kV	0,05 kA	0	0,058 MW	0	-89,53
Měření	48,2 V	50,5 V	0,06 A	0	0,078 W	0	-89,48
Rozdíl oproti výpočtům	1,69 %	1 %	20 %	0 %	34,48 %	0 %	0,05
U ₂ = 100 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	94,87 kV	100 kV	0,11 kA	0	0,257 MW	0	-89,53
Měření	95,7 V	100,5 V	0,12 A	0	0,206 W	0	-89,66
Rozdíl oproti výpočtům	0,87 %	0,5 %	9,09 %	0 %	-19,95 %	0 %	-0,13
U ₂ = 150 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	142,3 kV	150 kV	0,16 kA	0	0,546 MW	0	-89,53
Měření	143,2 V	150,6 V	0,18 A	0	0,464 W	0	-89,66
Rozdíl oproti výpočtům	0,63 %	0,4 %	12,5 %	0 %	-15,02 %	0 %	-0,13
U ₂ = 200 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	189,7 kV	200 kV	0,215 kA	0	0,979 MW	0	-89,53
Měření	191,5 V	201,4 V	0,24 A	0	0,827 W	0	-89,66
Rozdíl oproti výpočtům	0,95 %	0,7 %	11,63 %	0 %	-15,53 %	0 %	-0,13
U ₂ = 230,9 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	219,1 kV	230,9 kV	0,249 kA	0	1,34 MW	0	-89,53
Měření	218,9 V	230,4 V	0,27 A	0	1,241 W	0	-89,59
Rozdíl oproti výpočtům	-0,09 %	-0,22 %	8,43 %	0 %	-7,39 %	0 %	-0,06
U ₂ = 250 kV							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	237,2 kV	250 kV	0,269 kA	0	1,531 MW	0	-89,53
Měření	238,6 V	251,3 V	0,3 A	0	1,503 W	0	-89,59
Rozdíl oproti výpočtům	0,59 %	0,52 %	11,52 %	0 %	-1,83 %	0 %	-0,06

Tab. 5.5: Přenos vedení nakrátko

I ₂ = 400 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	37,4 kV	0	0,379 kA	0,4 kA	4,17 MW	0	84,35
Měření	36,3 V	0	0,395 A	0,416 A	10 W	0	76,53
Rozdíl oproti výpočtům	-2,94 %	0 %	4,22 %	4 %	139,81 %	0 %	-7,82
I ₂ = 433 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	40,3 kV	0	0,411 kA	0,433 kA	4,864 MW	0	84,35
Měření	39,7 V	0	0,431 A	0,454 A	12 W	0	76,42
Rozdíl oproti výpočtům	-1,49 %	0 %	4,87 %	4,85 %	146,71 %	0 %	-7,93
I ₂ = 500 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	46,7 kV	0	0,474 kA	0,5 kA	6,51 MW	0	84,35
Měření	46,6 V	0	0,506 A	0,533 A	16,85 W	0	76,2
Rozdíl oproti výpočtům	-0,21 %	0 %	6,75 %	6,6 %	158,83 %	0 %	-8,15
I ₂ = 667 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	62,3 kV	0	0,632 kA	0,667 kA	11,63 MW	0	84,35
Měření	62,4 V	0	0,68 A	0,717 A	29,49 W	0	76,6
Rozdíl oproti výpočtům	0,16 %	0 %	7,59 %	7,5 %	153,57 %	0 %	-7,75
I ₂ = 1000 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	93,4 kV	0	0,949 kA	1 kA	26,18 MW	0	84,35
Měření	93,6 V	0	1,041 A	1,096 A	65,45 W	0	77,06
Rozdíl oproti výpočtům	0,21 %	0 %	9,69 %	9,6 %	150 %	0 %	-7,29
I ₂ = 2000 A							
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁ (°)
Výpočty	187 kV	0	1,897 kA	2 kA	104 MW	0	84,35
Měření	186,8 V	0	2,262 A	2,373 A	253 W	0	78,5
Rozdíl oproti výpočtům	-0,11 %	0 %	19,24 %	18,65 %	143,27 %	0 %	-5,85

Tab. 5.6: Přenos přirozeného výkonu

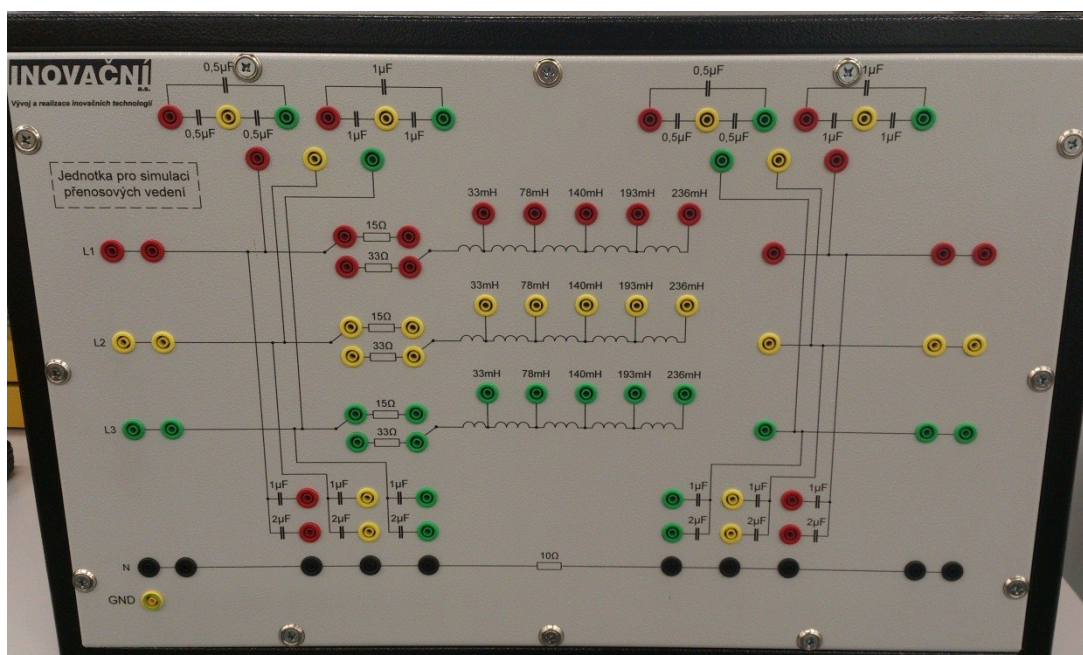
U ₂ = 50 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	50,9 kV	50 kV	0,174 kA	0,172 kA	79,5 MW	76,5 MW	-2,1	290,8
Měření	50,4 V	48 V	0,15 A	0,15 A	68,4 W	63,9 W	-	323,3
Rozdíl oproti výpočtům	-0,98 %	-4 %	-13,79 %	-12,79 %	-13,96 %	-16,47 %	-	11,18 %
U ₂ = 100 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	101,8 kV	100 kV	0,349 kA	0,344 kA	106 MW	102 MW	-2,1	290,8
Měření	99,2 V	93,3 V	0,32 A	0,32 A	94,5 W	88,2 W	-	295,6
Rozdíl oproti výpočtům	-1,68 %	-6,7 %	-7,78 %	-6,98 %	-10 %	-13,53 %	-	1,65 %
U ₂ = 150 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	152,7 kV	150 kV	0,523 kA	0,516 kA	239 MW	230 MW	-2,1	290,8
Měření	149 V	140 V	0,48 A	0,48 A	213 W	201 W	-	285,3
Rozdíl oproti výpočtům	-2,42 %	-6,67 %	-8,22 %	-6,98 %	-10,88 %	-12,61 %	-	-1,89 %
U ₂ = 200 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	203,6 kV	200 kV	0,698 kA	0,688 kA	426 MW	409 MW	-2,1	290,8
Měření	200,2 V	187,4 V	0,65 A	0,65 A	387 W	360 W	-	290,2
Rozdíl oproti výpočtům	-1,67 %	-6,3 %	-6,88 %	-5,52 %	-9,15 %	-11,98 %	-	-0,21 %
U ₂ = 230,9 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	235,1 kV	230,9 kV	0,805 kA	0,794 kA	567 MW	545 MW	-2,1	290,8
Měření	230,9 V	215,2 V	0,74 A	0,74 A	510 W	477 W	-	290,2
Rozdíl oproti výpočtům	-1,79 %	-6,8 %	-8,07 %	-6,8 %	-10,05 %	-12,48 %	-	-0,2 %
U ₂ = 250 kV								
	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	φ ₁	Z (Ω)
Výpočty	254,5 kV	250 kV	0,872 kA	0,859 kA	665 MW	638 MW	-2,1	290,8
Měření	249,3 V	231,8 V	0,78 A	0,79 A	582 W	546 W	-	293,5
Rozdíl oproti výpočtům	-2,04 %	-7,28 %	-10,55 %	-8,03 %	-12,48 %	-14,42 %	-	0,93 %

5.5 Návrhy úprav modelu

Úpravy jednotky na simulaci přenosových vedení:

- 1) Odpor (R) – velikost odporu $R_1 = 15 \Omega$ ponechat. Velikost odporů změnit z $R_2 = 33 \Omega$ na velikost odporu na $R_2' = 7 \Omega$ u každé fáze. Přidat odpor velikosti $R_3 = 4 \Omega$ u každé fáze.
- 2) Kapacita (C) – velikost kapacit se nemusí měnit. Přidat kapacitu s velikostí $C_3 = 0,5 \mu\text{F}$ pro každou fázi.
- 3) Indukčnost (L) – velikost indukčnosti zvětšit z $L_1 = 273 \text{ mH}$ na $L_1' = 500 \text{ mH}$ u každé fáze.

Po úpravách modelu se vedení může měřit pro délky až 500 km.



Obr. 5.5: Jednotka pro simulaci přenosových vedení

Závěr

V této diplomové práci je nastíněna problematika vedení zvláště vysokého napětí, která se používá pro přenos velkého množství energie nejčastěji na velké vzdálenosti. Podrobněji se zabývám parametry vedení. Parametry vedení jsou činný odpor, indukčnost, kapacita a svodová vodivost. Dále se zabývám teoretickým výpočtem střídavých vedení zvláště vysokého napětí, konkrétně se zabývám výpočtem s rovnoměrně rozloženými parametry a se soustředěnými parametry. Podrobněji je rozebráno řešení pomocí náhradního π – článku. Dále se zabývám stožáry dálkového vedení, konkrétně stožárem typu portál, pro který jsou vypočítány parametry vedení.

Hlavním cílem diplomové práce je přiblížit a tematicky zpracovat návrh laboratorní úlohy pro přenosovou schopnost vedení zvláště vysokého napětí. Zabývám se výpočtem parametru vedení. Dále se zabývám výpočtem parametrů na začátku vedení, když známe parametry na konci vedení. Vedení zvláště vysokého napětí je řešeno pro přenosové stavy nakrátko, naprázdno a pro přenos přirozeného výkonu. Podrobněji je řešen návrh laboratorního měření.

V praktické části se zabývám výpočtem parametrů vedení. Výpočtem odporu, indukčnosti, kapacity a svodové vodivosti. V další části diplomové práce se zabývám výpočtem náhradního schématu vedení pomocí π – článku. Vedení je vypočítáno pro délky 165 km a 300 km pro stavy naprázdno, nakrátko a pro přirozený výkon. Dále se zabývám návrhem laboratorního měření, při kterém je použit autotransformátor jako zdroj střídavého napětí, jednotka pro simulaci přenosových vedení jako model vedení a řízená zátěž. Pro měření vstupních a výstupních hodnot byl použit analyzátor kvality elektrické energie. Pro délku vedení 165 km bylo z naměřených hodnot vykresleno závislost napětí U_2 na činném výkonu P_2 , závislost proudu I_2 na činném výkonu P_2 a závislost činného výkonu P_2 na zátěži Z . Délka vedení 300 km je měřena pro odporovou zátěž, odporovo-indukční zátěží a indukční zátěží. Pro délku vedení 300 km bylo z naměřených hodnot vykresleno závislost napětí U_2 na činném výkonu P_2 , závislost proudu I_2 na činném výkonu P_2 a závislost činného výkonu P_2 na zátěži Z . Změřené hodnoty se liší od vypočtených, rozdíly jsou způsobeny různými fázovými úhly. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách, ve kterých jsou mezi sebou porovnané a je uveden procentní rozdíl od vypočítaných hodnot (viz tab. 5.1 – 5.6).

Literatura

- [1] Hradílek Z. : Elektroenergetiky, skripta VŠB-TU Ostrava 1992
- [2] G. A. Asti, R. C. da Silva, S. Kurokawa and E. C. M. da Costa : Identification of Transmission Line Parameters from Temporal Measurements of Currents and Voltages in Their Terminals: Influence oh the Length Line
- [3] Rusek S. : Teoretická elektroenergetiky, skripta VŠB-TU Ostrava 1999
- [4] Hodinka M. : Elektrické sítě I., skripta VŠB-TU Ostrava 1973 – I. Vydání
- [5] Santarius P. : Elektroenergetika I., skripta VŠB-TU Ostrava 1984 – I. Vydání
- [6] Kolovrat K. : Elektrické sítě I., skripta ČVUT Praha 1962
- [7] Horák K. : Elektroenergetika I., ALFA Bratislava 1971 – II. Vydání
- [8] Reiss L. a kolektiv : Teoretická elektroenergetika I., ALFA Bratislava 1977 – II. Vydání
- [9] Kozák J. : Ocelové stožáry a věže, SNTL Praha 1990 1977
- [10] Stožár portál [online]. [cit.2016-03-21]. Dostupné z:
<http://oenergetice.cz/technologie/elektoenergetika/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-3-dil-vedeni-400-kv/>
- [11] Santarius P. : Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava 1993

Seznam příloh

Příloha 1

Změřte odpor a indukčnost odboček cívky